

- [9] *Lepil, O.*: Fyzika pro gymnázia: Mechanické kmitání a vlnění. Prometheus, Praha, 1994.
- [10] *Lepil, O., Bednařík, M., Hýblová, R.*: Fyzika pro střední školy I (5. přeprac. vyd.). Prometheus, Praha, 2014.
- [11] *Štoll, I.*: Fyzika pro netechnické obory SOŠ a SOU. Prometheus, Praha, 2001.
- [12] *Svoboda, E., Bartuška, K., Bednařík, M., Lepil, O., Šíroková, M.*: Přehled středoškolské fyziky (5. přeprac. vyd.). Prometheus, Praha, 2014.
- [13] *Svoboda, E., Bartuška, K., Bednařík, M., Lepil, O., Šíroková, M.*: Přehled středoškolské fyziky (4. uprav. vyd.). Prometheus, Praha, 2006.
- [14] *Svoboda, E., Bartuška, K., Bednařík, M., Lepil, O., Šíroková, M.*: Přehled středoškolské fyziky (3. vyd.). Prometheus, Praha, 1998.
- [15] *Lepil, O., Svoboda, E.*: Příručka pro učitele fyziky na střední škole. Prometheus, Praha, 2007.
- [16] *Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.*: Fyzika 1 (2. přeprac. vyd.). VUTIUM, Brno, 2013.
- [17] *Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.*: Fyzika. Vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Část 2: Mechanika – Termodynamika. VUTIUM, Brno & Prometheus, Praha, 2000.
- [18] *Lepil, O., Houdek, V., Pecho, A.*: Fyzika pro III. ročník gymnázií (1. vyd.). SPN, Praha, 1986.
- [19] *Urgošák, B.*: Fyzika (2. uprav. vyd.). SNTL, Práce, Praha, 1987.
- [20] *Tarábek, P., Červinková, P. a kol.*: Odmaturuj z fyziky (2. vyd.). Didaktis, Brno, 2006.
- [21] *Lank, V., Vondra, M.*: Fyzika v kostce pro SŠ. Fragment, Praha, 2007.

Poznámka k silám působícím na kyvadlo

OLDŘICH LEPIL

Přírodovědecká fakulta UP, Olomouc

Příspěvek V. Žáka [I] je analýzou metodických postupů při interpretaci sil, které působí na (matematické) kyvadlo. Poněvadž předmětem analýzy jsou i učební texty, na nichž jsem se autorsky podílel [8–10, 12–15, 18],¹ vyjádřím se k problematice učiva o kyvadle obsáhleji. Především je třeba

¹Čísla odkazů v textu odpovídají citacím literatury v příspěvku V. Žáka [I]. Pro přehlednost jsou odkazy na literaturu v tomto příspěvku označeny římskými číslicemi.

si uvědomit, že význam učiva o kyvadle byl dán historicky tím, že představuje princip, na němž je založena funkce mechanického časoměrného zařízení – hodin, jejichž konstrukce Huygensem v 17. století znamenala revoluci v měření času. Proto je v teorii kyvadla věnována taková pozornost přesnosti určení jeho periody. Tento význam již kyvadlo definitivně pozbylo a stěží bychom hledali nějaké jiné praktické využití kyvadla v podobě známé ze středoškolských učebnic fyziky, popř. soudobou technologií jako důvod, proč by znalost teorie kyvadla měla patřit k všeobecnému vzdělání.

Opodstatnění toho, aby naše učebnice fyziky ještě učivo o kyvadle obsahovaly, vidím v jeho didaktickém významu. Ten spočívá v tom, že jde o jednoduchý, snadno realizovatelný objekt, na němž lze velmi dobře objasnit pojem kmitavý pohyb a jeho harmonický průběh (i když jsem stále přesvědčen, že pružinový oscilátor tuto funkci plní lépe). Pochopení podmínek vzniku a základních charakteristik harmonického kmitání kyvadla může být vhodným prekonceptem k lepšímu pochopení v současnosti podstatně významnějšího, ale z poznávacího hlediska abstraktnějšího elektromagnetického kmitání.

Tento přístup k učivu o kyvadle se odrážel i v tom, že v učebnici [18], která byla pokusem o modernější výklad periodických dějů v podobě integrované poznatkové soustavy učiva o mechanickém a elektromagnetickém kmitání, téma kyvadlo zpracováno není. S kyvadlem se zde žák setká jen v podobě ilustrace pojmu mechanický oscilátor (důsledně není v textu použito slovní spojení matematické kyvadlo). V teoretickém cvičení se pak řešením konkrétního příkladu dospěje ke vztahu pro periodu kmitání kyvadla a didaktický potenciál kyvadla je využit v laboratorním cvičení. V něm je žakovským experimentem ověřována závislost periody kmitání kyvadla na jeho délce. Cenná je také možnost, určit pomocí kyvadla přibližnou hodnotu tíhového zrychlení. Jiné zdůvodnění, proč by kyvadlo mělo v našich učebnicích setrvat, nevidím.

Je ovšem třeba dodat, že na vyšší úrovni fyzikálního vzdělávání může být kyvadlo výchozím modelem i složitějších systémů, jako je třeba kmitání vázaných oscilátorů – sprážených kyvadel. Jiným příkladem je kyvadlo se závěsem v podobě lehké tuhé tyče, jehož pohyb v rovině nemusí být omezen na malé výchylky, jak to požadujeme u matematického kyvadla, ale jeho počáteční úhlová výchylka může být až 180° . Takové kyvadlo (rotátor) může konat kruhový pohyb s proměnnou úhlovou rychlostí a je modelem dynamického systému, který kmitá anharmonicky. Obdobným,

často prezentovaným modelem je také dvojitě kyvadlo jako příklad systému vykazujícího chaotické chování (viz [II], kap. 7).

Vývoj didaktických systémů učiva má velmi značnou setrvačnost a tak na počátku 90. let minulého století vznikl určitý tlak zejména ze strany učitelů z praxe, vrátit se k tradiční struktuře učiva, jak se formovala ještě v 2. polovině 19. století. Ústupkem tomuto tlaku je vznik souboru tematických učebnic a mezi nimi i učebnice [9], v níž je učivo o mechanickém kmitání společně s mechanickým vlněním a akustikou. Dalším krokem zpět ke koncepci, která odpovídá uspořádání učiva v prvních poválečných osnovách fyziky pro gymnázium, je Rámcový vzdělávací program gymnaziálního vzdělávání [2], kde je kmitání součástí tematického celku „Pohyby těles a jejich vzájemné působení“ a je vymezeno heslem „kmitání mechanického oscilátoru, jeho perioda a frekvence“ (s. 28). Je tedy na učiteli, zda svůj výklad bude opírat o pružinový oscilátor nebo kyvadlo a zda vůbec kyvadlo do učiva zařadí.

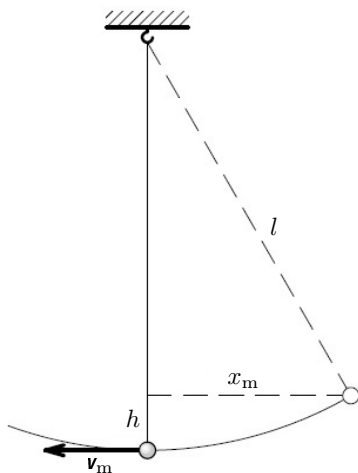
Aby měl učitel tuto možnost volby, je v učebnici [8] podrobněji než v učebnici [18] zpracováno jak kmitání pružinového oscilátoru, který má jasnou prioritu, tak kyvadlo, včetně jeho abstrakce v podobě matematického kyvadla, bez další návaznosti na výklad kmitání fyzického kyvadla, které v současnosti středoškolským učivem není. Pro jeho smysluplný výklad není totiž v potřebném rozsahu vyložen pojem moment setrvačnosti a jeho závislost na vzdálenosti těžiště od osy otáčení (Steinerova věta).

Teorie kyvadla ve středoškolském učivu plní tři základní cíle s obecnějším vztahem k dalším poznatkům:

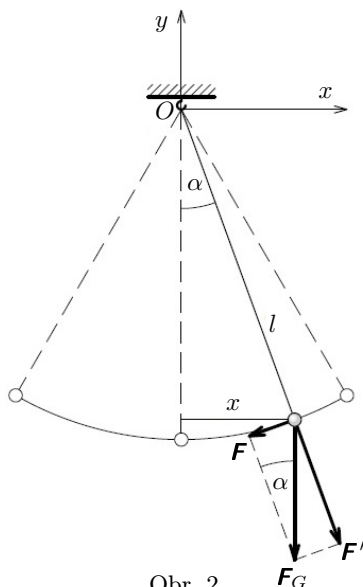
1. Kyvadlo je příkladem mechanického oscilátoru, který kmitá harmonicky.
2. Perioda vlastního kmitání kyvadla je funkcí jeho parametru (délky) a nezávisí na počátečních podmínkách (na amplitudě výchylky a energii oscilátoru v počátečním okamžiku).
3. Pohyb kyvadla (netlumeného harmonického oscilátoru) charakterizují periodické přeměny dvou forem mechanické energie.

Tím se dostáváme k problému grafického znázornění vektorových veličin, na jejichž interpretaci je další výklad založen. Můžeme zvolit třeba méně častý a matematicky poněkud náročnější metodický postup s užitím zákona zachování energie (viz např. [III], s. 11) a vystačíme s jednoduchým vyobrazením s jedinou vektorovou veličinou – rychlostí \mathbf{v} (obr. 1). Odvodíme tak vztah pro periodu T kyvadla, ale zůstávají poněkud skryty důkazy o harmonickém pohybu kyvadla a jeho časovém průběhu. Proto je

vhodnější a častější postup, kterým dokážeme, že na těleso kyvadla působí harmonicky proměnná síla. K tomu nám v podstatě postačuje zjistit, že touto silou je složka F tíhové síly F_G do směru tečny k trajektorii (obr. 2, [III]). Ve vztažné soustavě (Oxy) se tato složka mění podle funkce sinus ($F = -mg \sin \alpha$), z čehož intuitivně vyplývá, že také odpovídající kinematické veličiny pohybu kyvadla se budou měnit podle funkce sinus, popř. kosinus. Výklad založený na tomto diagramu sil nutně nevyžaduje, aby jako výchozí situace byla volena krajní poloha závaží odpovídající amplitudě výchylky kyvadla.



Obr. 1



Obr. 2

Jestliže cílem výkladu je jen ukázat, že příčinou harmonického kmitání kyvadla je periodicky proměnná síla, má podle mého soudu smysl zabývat se jen nalezením této síly a nekomplikovat výklad silami, na nichž velikost a směr síly způsobující harmonický pohyb nezávisí. Proto je zřejmě nejjednodušší, zvolit jako výchozí situaci, odpovídající obr. 1 v [I]. Za ekvivalentní lze považovat i nalezení tzv. „vratné“ síly složením tíhové síly a tahové síly vlákna (obr. 3a v [I]), nebo pomocí vektorového znázornění všech těchto sil, jak je tomu na obr. 2a. Vložním klíčových hesel *kyvadlo* nebo *pendulum*, popř. *fadenpendel* nebo *mathematisches pendel* do vyhledávače se snadno přesvědčíme, že takto řeší výklad kmitání kyvadla naprostá většina učebních textů.

Poznámka. V této souvislosti připomenu, že termín *matematické kyvadlo*, označující abstraktní model „hmotného bodu zavěšeného na nehmotném vlákně“, se v anglicky psaných textech používá jen v menší míře (*mathematical pendulum*). Nejčastěji se setkáváme s obecným termínem *pendulum*, jehož elementárním příkladem je *simple pendulum*. To potvrzuje i úryvek originálu známé učebnice [IV], jejíž český překlad [16, 17] je rovněž součástí analýzy v [I] (obr. 3). Překladaelé zde termín *pendulum* i *simple pendulum* ztotožňují s termínem *matematické kyvadlo* [17, s. 418].

13.4 THE PENDULUM

8.11
8.12

The **simple pendulum** is another mechanical system that exhibits periodic motion. It consists of a particle-like bob of mass m suspended by a light string of length L that is fixed at the upper end, as shown in Figure 13.12. The motion occurs in the vertical plane and is driven by the force of gravity. We shall show that, provided the angle θ is small (less than about 10°), the motion is that of a simple harmonic oscillator.

The forces acting on the bob are the force \mathbf{T} exerted by the string and the gravitational force $m\mathbf{g}$. The tangential component of the gravitational force, $mg \sin \theta$, always acts toward $\theta = 0$, opposite the displacement. Therefore, the tangential force is a restoring force, and we can apply Newton's second law for motion in the tangential direction:

$$\sum F_t = -mg \sin \theta = m \frac{d^2 s}{dt^2}$$

where s is the bob's displacement measured along the arc and the minus sign indicates that the tangential force acts toward the equilibrium (vertical) position. Because $s = L\theta$ (Eq. 10.1a) and L is constant, this equation reduces to

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = -\frac{g}{L} \sin \theta$$

The right side is proportional to $\sin \theta$ rather than to θ ; hence, with $\sin \theta$ present, we would not expect simple harmonic motion because this expression is not of the form of Equation 13.17. However, if we assume that θ is small, we can use the approximation $\sin \theta \approx \theta$; thus the equation of motion for the simple pen-

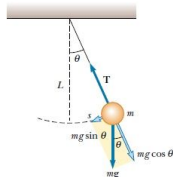


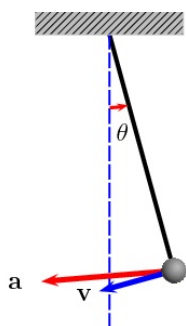
Figure 13.12 When θ is small, a simple harmonic motion about the equilibrium position $\theta = 0$. The restoring force is $mg \sin \theta$, the component of the gravitational force tangent to the arc.

Obr. 3

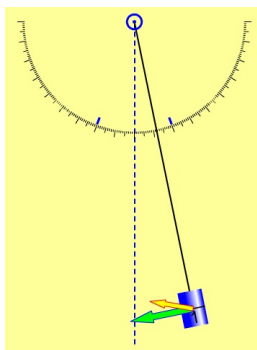
Od zmíněných vektorových diagramů se odlišuje obr. 3b a 3c v [I], kdy není těleso kyvadla v krajní poloze a má tedy nenulovou rychlost. Diskutovaným problémem je v tomto případě další síla působící na těleso kyvadla, kterou je z hlediska inerciální vztahné soustavy dostředivá síla. Tato síla zvětšuje tahovou sílu vlákna a výslednice všech působících sil již nemá směr tečny k trajektorii kmitajícího tělesa. Směr výslednice se od tečného směru odchyľuje a v rovnovážné poloze, kdy má těleso největší rychlost, míří k bodu závěsu kyvadla. Velikost výslednice dosahuje minima a tangenciální složka tíhové síly je nulová.

Snadno to lze ukázat počítačovým modelem, jehož program všechny působící síly zohledňuje, a zobrazuje jejich vektorový součet. Směr výslednice všech sil je patrný ze směru zobrazeného vektoru zrychlení (obr. 4, [V]). Podobně zobrazuje kmitání kyvadla aplet [VI] (obr. 5). Je ovšem otázka, zda je účelné tak podrobným rozbořem pohybu kyvadla žáka zatěžovat a výslednicí všech působících sil ho vlastně mást, když víme, že tečná síla,

kteřá je pro harmonický pohyb kyvadla určující, dostředivou silou ovlivněna není. Dostředivá síla je v každém okamžiku k trajektorii kmitajícího tělesa kolmá a tudíž nemá tečnou složku.

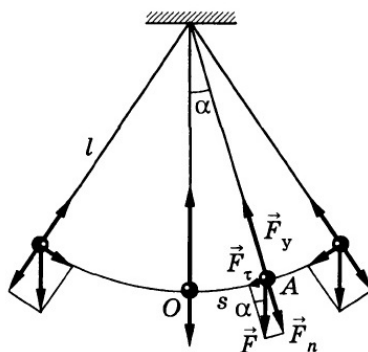


Obr. 4



Obr. 5

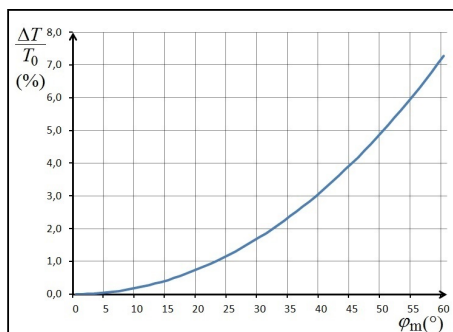
I když se zcela ojediněle vektorový diagram zohledňující dostředivou sílu v některých zahraničních středoškolských učebnicích objevuje, v žádné se všechny zobrazené síly do teorie kmitání kyvadla nezahrnují. Takové vyobrazení najdeme např. v učebnici [VII, s. 12] (obr. 6), určené pro rozšířenou výuku fyziky na ruské střední škole. Zakresleny jsou změny velikosti tahové síly F_y vlákna v průběhu jednoho kyvu, ale v textu není k těmto změnám žádné vysvětlení. Ve skutečnosti se poněkud mění také velikost síly F_n , což ovšem z obr. 6 patrně není.



Obr. 6

Absence dostředivé síly při výkladu teorie kyvadla odpovídá skutečnosti, že matematickému kyvadlu jako modelu harmonického oscilátoru

odpovídá jeho linearizovaná podoba (viz např. [4, s. 104]). Je to tedy systém, který kmitá s malou amplitudou výchylky φ_m , při níž $\sin \varphi_m \approx \varphi_m$ (v radiánech). Jen v tomto případě má diferenciální rovnice popisující pohyb kyvadla jednoduché řešení, kterým je rovnice harmonického pohybu s periodou kmitání $T_0 = 2\pi\sqrt{l/g}$. Jestliže je amplituda výchylky kyvadla větší, zvětšuje se i perioda T kmitání ($T > T_0$) a kmitání již není přesně harmonické. Relativní odchylka periody $\Delta T/T_0 \approx 0,25 \sin^2(\varphi_m/2)$. Na obr. 7 je graficky znázorněna relativní odchylka skutečné periody kyvadla při rostoucí amplitudě úhlové výchylky. Pro některé úhly je relativní odchylka periody $(T - T_0)/T_0$ reálného kyvadla uvedena v tabulce 1.



Obr. 7

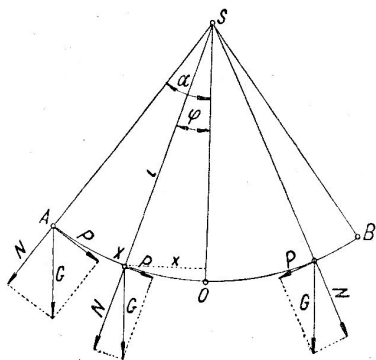
Tabulka 1

φ_m (°)	5	10	20	30	60
$\frac{\Delta T}{T_0}$ 100 (%)	0,05	0,19	0,77	1,74	7,28

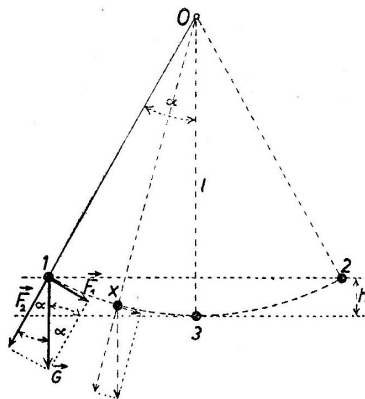
Graf potvrzuje v učebnicích uváděný požadavek, aby amplituda úhlové výchylky $\varphi_m < 5^\circ \approx 0,1$ rad. Relativní odchylka lineárně rostoucí hodnoty φ_m a $\sin \varphi_m$ je 0,12 % a relativní odchylka periody kyvadla je řádu 10^{-2} %. Ve školské praxi z důvodu názornosti obvykle uvažujeme kyvadlo s větší počáteční výchylkou a relativní odchylku periody kyvadla, která obvykle nepřekročí 2,5 %, tolerujeme. Ovšem i potom je dostředivá síla malá (viz dále). Při školních experimentech se závažím zavěšeným na vlákně bychom tento mechanický oscilátor měli označovat spíše než jako matematické kyvadlo slovním spojením třeba *jednoduché kyvadlo*, jak je to použito např. v učebnici [IV].

V českých učebnicích se rovněž objevují vyobrazení, která naznačují i situace mimo krajní polohy kyvadla. Jako příklad poslouží vyobrazení

z učebnic [VIII] (obr. 8) a [IX] (obr. 9), které pochopitelně problém dostředivé síly rovněž neřeší. Podobně je tomu i v současné učebnici [8], které je neoprávněně vytýkáno, že dostředivá síla není do diagramu sil zahrnuta (viz [6]). Pokud bychom nahlédli do některé z vysokoškolských učebnic renomovaných autorů (Horák, Slavík, Nachtikal aj.), v žádné z nich na problém dostředivé síly při pohybu kyvadla nenarazíme.



Obr. 8

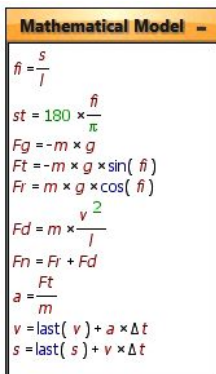


Obr. 9

Autor studie [I] se také zmiňuje o možném vzniku miskoncepce. Domnívám se, že tyto miskoncepce mohou přímo pramenit ze zbytečně komplikovaných silových diagramů, k nimž má nejbližší diagram se zobrazením výsledné síly obdobně, jak je to patrné z obr. 4 a 5. Za krajní situace, kdyby bylo rigorózně požadováno zohlednění dostředivé síly (obr. 5a v [I]) u reálného (nikoliv matematického) kyvadla, lze považovat za optimální návrh diagramu sil, který je na obr. 5b v [I]. Je to v podstatě stejné řešení, jaké je použito v učebnici [VII] (viz obr. 6). Do jaké míry je to však nutné, se můžeme přesvědčit pomocí jednoduchého počítačového modelu, který si popř. mohou ve škole vytvořit i sami žáci a lépe tak proniknout do celého problému. Současně to může být docela zajímavý námět pro rozbor silového působení na zavěšené těleso, které koná zrychlený pohyb po kružnici. Harmonický kmitavý pohyb je pak jeho zvláštním případem pro malé počáteční výchylky. Vytvořením modelu zde obejdeme skutečnost, že na střední škole není zaveden pojem úhlové zrychlení.

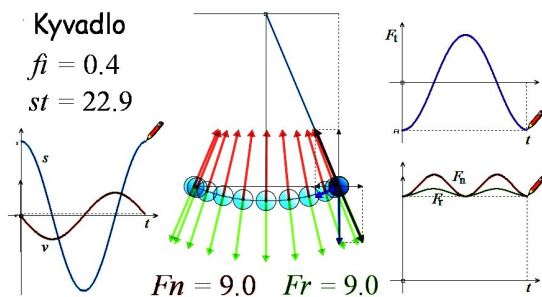
Model pro studium pohybu kyvadla je vytvořen programem Modellus 4 [X] a Eulerovou metodou se řeší pohyb kyvadla délky $l = 1$ m se závažím o hmotnosti $m = 1$ kg a s počáteční výchylkou $\varphi_m = 0,4$ rad $\approx 23^\circ$, což

přibližně odpovídá výchylce závaží vodorovným směrem o 0,4 m od rovnovážné polohy (odchylka φ_m a $\sin \varphi_m$ je 2,7 %). Jde tedy o reálnou situaci, s níž se setkáváme při školním experimentu. To umožňuje zobrazit dostředivou sílu, jejíž velikost by při malých úhlech byla v použitém měřítku prakticky nezobrazitelná. Model kyvadla zapsaný v prostředí programu Modellus 4 je na obr. 10.



Obr. 10

Na grafickém výstupu (obr. 11) je vlevo časový diagram kinematických veličin s a v . Vpravo nahoře je graf tečné síly a dole je srovnání velikosti radiální síly $F_r = mg \cos \varphi$ a tahové (normálové) síly vlákna $F_n = F_r + m \frac{v^2}{l}$. Spuštěním programu se přesvědčíme, že se v průběhu periody kmitu periodicky zvětšuje tahová síla vlákna, ale tečná složka síly způsobující kmitavý pohyb kyvadla je v každém okamžiku jen složkou tíhové síly do směru tečny k trajektorii, čili má velikost $F_t = mg \sin \varphi$.



Obr. 11

Z obr. 11 je patrné, že i při poměrně velké výchylce kyvadla je vliv dostředivé síly F_d na velikost normálové složky F_n malý a méně pozorný žák změnu ani nepostřehne. Ještě lépe je to zřejmé z tabulky 2, kde je v procentech vyjádřen rozdíl velikostí sil F_r a F_n při různých počátečních výchylkách kyvadla. Velikost síly F_r odpovídá počáteční hodnotě při výchylce s kyvadla z rovnovážné polohy ve vodorovném směru (v rovnovážné poloze $F_r = F_G = 9,8$ N). Normálová síla $F_n = F_r + F_d$ a v tabulce je uvedena největší možná hodnota velikosti této síly v průběhu periody.

Tabulka 2

s (m)	φ_m (°)	F_r (N)	F_n (N)	ΔF (%)
0,50	30	8,6	12,2	24,5
0,40	23	9,0	11,4	15,8
0,30	17	9,4	10,7	8,9
0,20	11	9,6	10,2	4,0
0,15	8,6	9,7	10,0	2,2
0,10	5,7	9,8	9,9	1,0

Závěr

Obr. 11 a tabulka 2 dokládají, že teorie kyvadla na středoškolské úrovni nevyžaduje, aby do výkladu jeho harmonického kmitání byla zahrnuta také dostředivá síla. Žádný učební text u nás, ale zřejmě ani v zahraničí k ní při výkladu kyvadla nepřihlíží. Z mnoha odkazů na webu se zcela ojediněle podařilo najít text jen s kvalitativní ilustrací zahrnující dostředivou sílu (např. [XI, XII, XIII]). Na základě uvedených poznatků autor tohoto příspěvku v nově připravovaném vydání přepracovaného textu učebnice [8] o interpretaci dostředivé síly při výkladu kyvadla neuvažuje.

Literatura

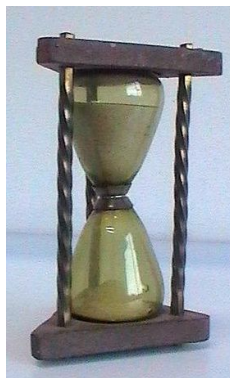
- [I] Žák, V.: Síly působící na matematické kyvadlo na 7 + 1 způsob. MFI roč. 25 (2016), č. 4, s. 266–276.
- [II] Lepil, O. a kol.: Fyzika aktuálně, příručka nejen pro učitele fyziky, Prometheus, Praha, 2009.
- [III] Šedivý, P., Volf, I., Horáková, R.: Harmonické kmity mechanických soustav. MAFY, Hradec Králové, 2000. Dostupné na: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/kmity.pdf>.
- [IV] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.: Fundamentals of Physics, 9th edition. John Wiley & Sons, 2011.

- [V] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/24/Oscillating_pendulum.gif
- [VI] https://phet.colorado.edu/sims/pendulum-lab/pendulum-lab_cs.html
- [VII] *Mjakišev, G. Ja., Sinjakov, A. Z.*: Fyzika: Kolebanija i volny, Učebnik dlja uglublenogo izučenija fiziky, Drofa, Moskva, 2002.
Dostupné na: <http://slovo.ws/urok/fizika/11/001/012.html>.
- [VIII] *Chytilová, M. a kol.*: Fyzika pro třetí třídu gymnasií, SPN, Praha, 1953.
- [IX] *Vanovič, J. a kol.*: Fyzika pro II. ročník SVVŠ, SPN, Praha, 1965.
- [X] <http://modellus.fct.unl.pt>.
- [XI] <http://www.physicsclassroom.com/class/waves/Lesson-0/Pendulum-Motion>.
- [XII] <http://www.kostenlose-referate.de/das-fadenpendel-108.html>.
- [XIII] <http://www.sciencesphysiques2010.esy.es/tsch05.htm>.

Přesýpací hodiny v hodině fyziky

RENATA HOLUBOVÁ

Přírodovědecká fakulta UP, Olomouc



Zamysleli jste se někdy nad tím, jak fungují přesýpací hodiny? Co je na vytékání písku zajímavého? Přesýpací hodiny byly běžně používány ve středověku k měření časových intervalů v délce od jedné minuty až do tří hodin, výjimečně intervalů delších. Rozšíření přesýpacích hodin bylo podmíněno rozvojem sklářského průmyslu – dovednost výroby baňky z průhledného skla. Jako náplň přesýpacích hodin se používaly různé granuláty – písek, kovový prášek, rozemletý mramor, vaječné skořápky. Nevýhodou těchto hodin bylo, že se musely překlápět a dlouhodobým používáním se předcházely. Zrníčka se omí-

lala, otvor, kterým propadávala, se zvětšoval. Koncem 18. stol. byly nahrazeny mechanickými hodinami. Přesto se s různými variantami přesýpacích hodin můžete setkat i dnes.

Vlastnosti písku – granulátu

Písek se chová jako kapalina či jako pevná látka. U kapaliny závisí rychlost výtoku z otvoru ve stěně nádoby na výšce kapaliny nad otvorem,