

# PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 33 (2005/2006)

Številka 2

Strani 20-24

Barbara Rovšek in Tomaž Kušar:

## SEDMI IN OSMI ČLEN VERIGE EKSPERIMENTOV

Ključne besede: fizika, svetovno leto fizike, verižni eksperiment, popularizacija fizike.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/33/1615-Rovsek-Kusar.pdf>

© 2005 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2010 DMFA - založništvo

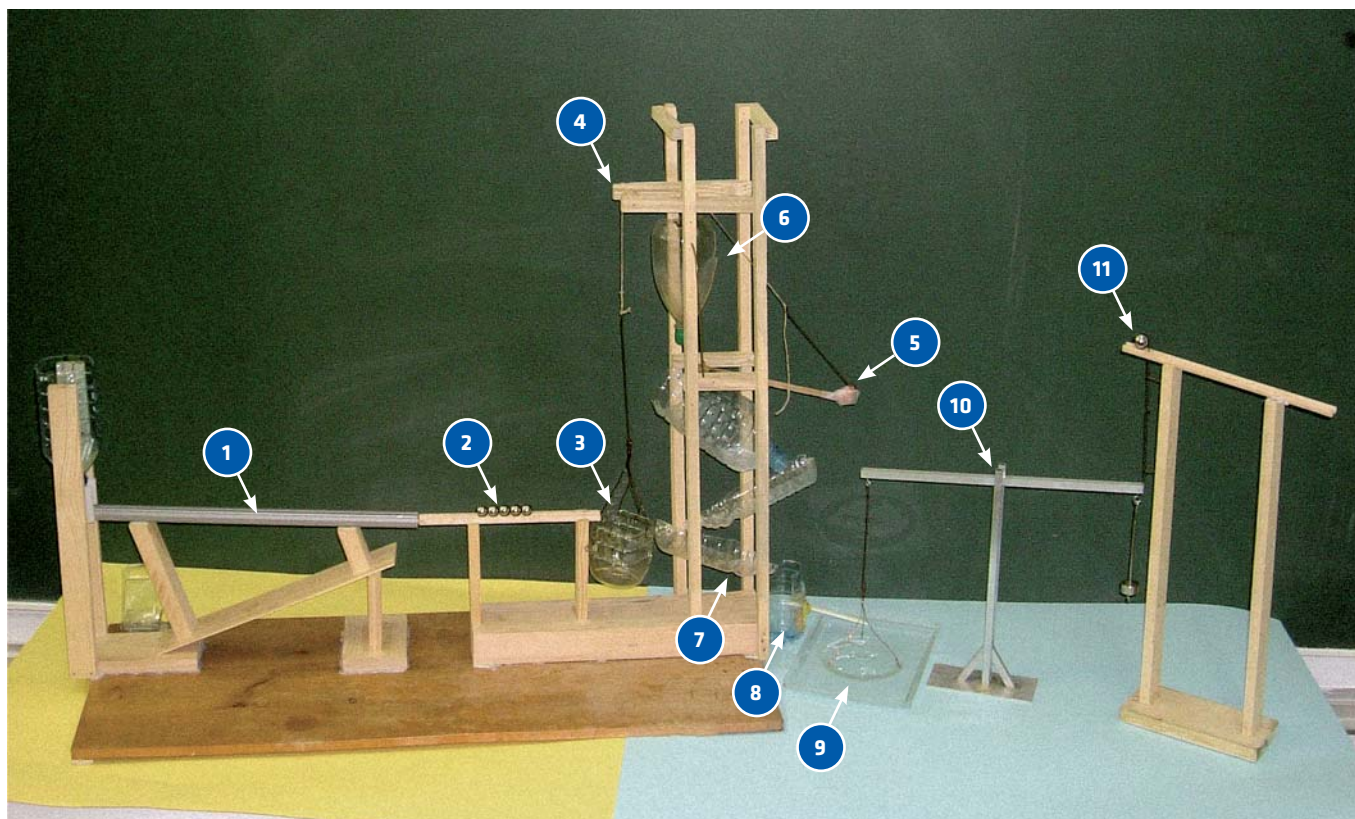
Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

# Sedmi in osmi člen verige eksperimentov

Barbara Rovšek  
in Tomaž Kušar

Sedmi in osmi člen demonstracijske verige verižnega eksperimenta so si zamislili in sestavili bodoči učitelji in učiteljice fizike, študentje in študentke Pedagoške fakultete Univerze v Ljubljani. V obeh členih prevladujejo pojavi iz mehanike: prožni trki kroglic med seboj in neprožni trki kroglic z drugimi telesi, ravnovesje vzvoda, prenos sil preko vrvic in škripcev ter sklopljeno nihanje. Poleg teh v obeh členih domiselno nastopajo tudi »mokri« pojavi, povezani s pretakanjem kapljev, difuzijo in površinsko napetostjo. Brez elektrike in magnetkov pa tudi tu ne gre.

**Slika 1.** Avtorja poskusa *Vodni svet* sta TOMAŽ KUŠAR in GREGOR UDOVČ, Oddelek za fiziko in tehniko, Pedagoška fakulteta Univerze v Ljubljani.



## ■ SEDMI ČLEN Vodni svet

Kaj se godi v sedmem členu, ki sta ga avtorja poimenovala *Vodni svet*? Tudi tega sproži kroglica, ki se prikotali po žlebu (1) iz prejšnjega poskusa ter na vodoravnem lesenem tiru trči v prvo od enakih mirujočih petih kroglic (2), postavljenih na tiru tesno druga ob drugo. Peta kroglica se odkotali po tiru naprej. S tira pade v lovilno košarico (3), ki je preko vrvice in škripca (4) povezana s prvim vzvodom (5). Ta se prevesi in pri tem odmaši luknjico na dnu z vodo napolnjenega kozarčka (6). Voda iz kozarčka odteka in se pretaka navzdol po sistemu žlebov (7) do spodnjega kozarčka, v katerem je nekaj kapljic koncentriranega mila (8). Ko v spodnji kozarček priteka voda, nastaja v njem milnica, njena gladina se počasi dviguje.

Nekaj centimetrov nad dnom spodnjega kozarčka je luknjica s slamico. Ko se gladina milnice dvigne do slamice, milnica odteče v pladenj s čisto vodo.

Globina vode v pladnju je približno 1 cm. Preden priteče v pladenj milnica, na gladini miruje zgoščanka

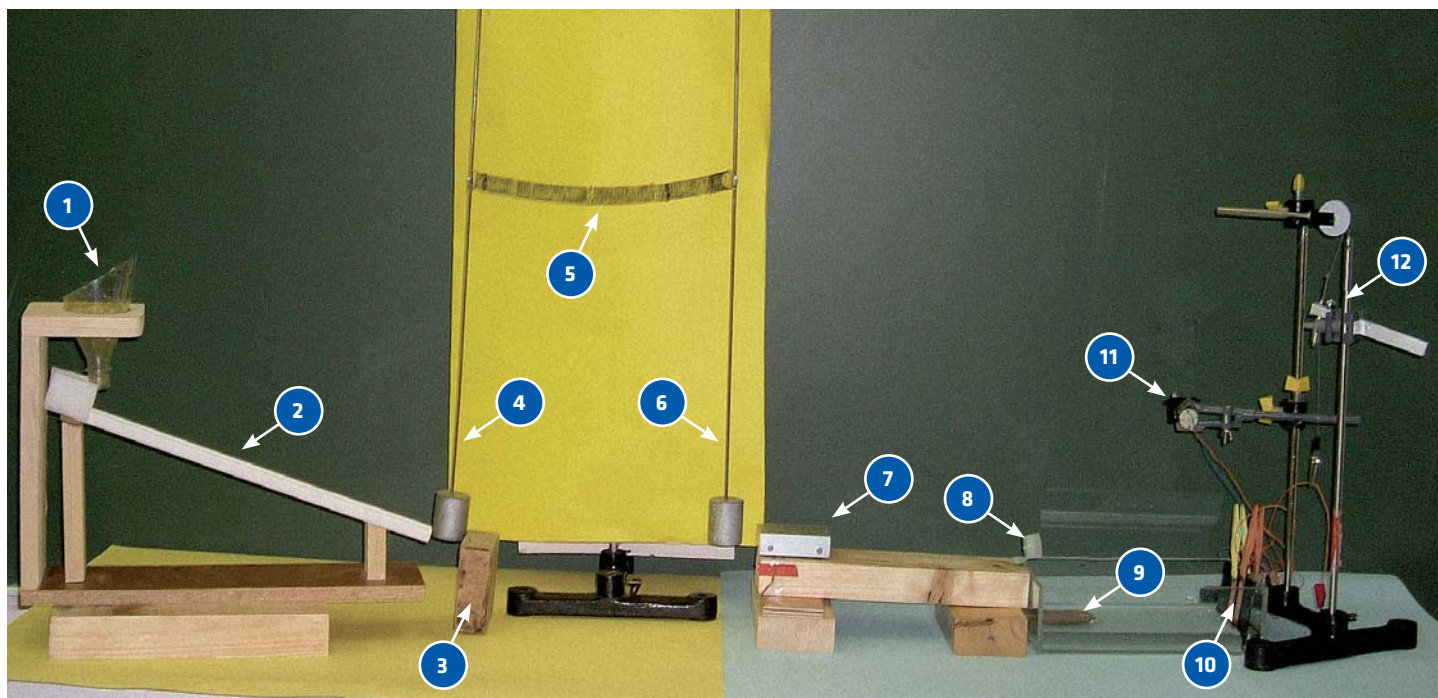
(9). Visi na vrvicah, pritrjenih na en konec enakoročnega vzvoda (10). Na drugem koncu vzvoda skrbi za ravnovesje utež s primerno izbrano maso. Ko v pladenj po slamici priteče milnica, se zmanjša površinska napetost vode, zgoščanka (9) se odlepi od gladine in utež prevesi vzvod. Ob tem vzvod izmakne zatič, ki v končnem tiru zadržuje zadnjo kroglico (11). Kroglica ima prosto pot in se odkotali k osmemu členu.

## ■ OSMI ČLEN Svet gibanja

Od sedmega člena se kroglica prikotali v lijak v osmem členu, ki se imenuje *Svet gibanja*. Iz lijaka (1) pade na nagnjeno drčo (2) in se po njej odkotali navzdol.

Ko se kroglica prikotali do konca drče, trči v mirujočo klado (3), ta se ob trku prevrne. Klada je pred trkom s kroglico zadrževala v mirovanju prvo nihalo (4), že odklonjeno iz mirovne lege. Ko se klada prevrne, sprosti prvo nihalo, ki zaniha. Ker je prvo nihalo preko vzmeti (5) povezano z drugim nihalom (6), se nihanje sčasoma prenese k drugemu nihalu. Ampli-

**Slika 2.** Avtorici poskusa *Svet gibanja* sta BERNARDA URANKAR IN JERNEJA PAVLIN, Oddelek za fiziko in tehniko, Pedagoška fakulteta Univerze v Ljubljani.



tuda nihanja prvega nihala se počasi manjša, amplituda drugega pa se večja.

Če bi nihali opazovali še naprej, bi videli, da se nihanje kar naprej prenaša od enega nihala k drugemu in nazaj. Temu pojavu pravimo utripanje.

Ko drugo nihalo niha z dovolj veliko amplitudo, trči na drugi strani ob voziček (7). Nihalo sune voziček čez nizko oviro, ki je pred tem zadrževala voziček na vrhu klanca. Voziček se zapelje po klanecu in na koncu trči ob posodico, v kateri je nekaj kapljic detergenta za pomivanje posode (8). Posodica se nagne in iz nje se prelije kapljica detergenta v posodo s čisto vodo na mesto, kjer ob steni posodice miruje čolniček (9). Ko kane kapljica detergenta v vodo, se na tistem delu zelo hitro močno zmanjša njena površinska napetost.

Zaradi razlike med površinsko napetostjo čiste vode na eni strani in milnice na drugi strani čolnička deluje nanj sila, ki ga potisne stran od roba posode proti nasprotni steni posode.

Čolniček, ki nosi na svojem kljunu železno prečko, pripluje do nasprotne stene posode. Tam ga magnetki, pritrjeni na steno posode (10), potegnejo v pravilno pristajalno lego: z železno prečko, ki jo prisloni na dve elektrodi (10), sklene električni krog.

Po sklenjenem krogu baterija požene tok in elektromotor (11) prične navijati vrvico, na katero je pritrjena utež. Utež se dviguje in skozi odprtino v žlebu zadene kroglico (12), ki se odkotali iz zagozde in sproži naslednji, deveti člen (beri o njem v naslednji številki Preseka).

## Pojavi

Malce podrobneje se bomo posvetili dvema pojavoma, udeleženi v opisanih členih, in sicer površinski napetosti ter sklop-ljenemu nihanju.

### Površinska napetost

Kot slutimo po imenu, je pojav vezan na površine, natančneje, površine kapljev. Kapljevine se od plinov ločijo med drugim tudi po tem, da plini nimajo površin in zato tudi površinske napetosti ne. Plini ne tvorijo kapelj. Obstoj površinske napetosti v kapljevinah ima mnoge zanimive posledice, povezane s prav vsakdanjimi pojmi in pojavi. V kozarec lahko nalijemo vodo malo višje od njegovega roba, pa se ne prelije iz kozarca. Opazimo, da se majhne kapljice rade zlivajo v večje in da jutranja rosa na listih oblikuje skoraj okrogle kapljice. Dva suha lista papirja zlahka spravimo narazen, če pa sta mokra, ju voda zlepi. Goto-vo si že opazil, da včasih reči, za katere bi pričakoval, da v vodi

potonejo, na njeni gladini plavajo. Kovinske sponke za papir in šivanke, ki jih previdno položimo na vodno gladino, ne potonejo, če jih prej ne zmočimo. Bivalni prostor nekaterih žuželk je gladina mlak in ribnikov, po njej se zaradi površinske napetosti vode sprehajajo kot bi se mi po napeti ponjavi trampolina.

Od običajnih kapljev in ima voda največjo površinsko napetost, večjo ima le živo srebro (glej tabelo). Površinska napetost je posledica privlačnih sil med polarnimi molekulami kapljevine. Posamezna molekula vode je rada v družbi drugih molekul (fizikalno korektno bi rekli, da je to zanjo energijsko ugodneje). Molekule na površini imajo manj sosedov kot molekule v notranjosti, zato so molekule na površini v energijsko manj ugodnem položaju. Čim večja je pri dani prostornini vode njena površina, tem večjo energijsko ceno plačamo.

Najmanjšo površino ima dana količina vode tedaj, ko je omejena v kroglo. Razmerje med površino in prostornino krogle je,  $\frac{S}{V} = \frac{3}{R}$  kjer je  $R$  polmer krogle, določen s količino vode. Pri koc-ki je na primer to razmerje večje,

$$\frac{S}{V} = \frac{6a^2}{a^3} = \frac{6}{R} \sqrt{\frac{3}{4\pi}} = \frac{3,72}{R}$$

(pri enaki prostornini,  $a^3 = \frac{4\pi}{3} R^3$ ). Kapljice so zato bolj ali manj okrogle, kot so zaradi istega vzroka okrogli tudi mehurčki  $\text{CO}_2$  v mineralni vodi. Hkrati pa vidimo, da je razmerje  $\frac{S}{V}$  odvisno tudi od količine vode: čim več je vode, tem večji je  $R$  in tem manjše je  $\frac{S}{V}$ . Majhne kapljice se zato rade zlivajo v večje.

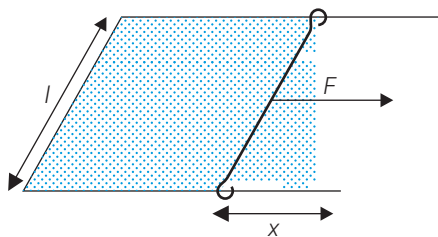
Za povečanje površine za  $\Delta S$  je potrebno delo, ki je premo sorazmerno z  $\Delta S$ ,  $A = \gamma \Delta S$ . Sorazmernostni koeficient  $\gamma$  je lastnost snovi in pove, ali moramo za povečanje površine opraviti veliko ali malo dela. Koeficient  $\gamma$  imenujemo kar površinska napetost, merimo jo v  $\text{J/m}^2 = \text{N/m}$ .

V pravokotno žično zanko, ki ji eno stranico lahko premikamo, ujamemo membrano iz milnice (z vodo se nam ta poskus ne po-

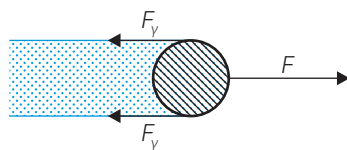
snov	$\gamma$ [N/m]
čista voda	0,073
živo srebro	0,44
milnica	≈ 0,025
kri (37°)	0,058
olje	0,032
acetone	0,025
etanol	0,023

**Tabela 1.** Površinska napetost nekaterih kapljev pri temperaturi 20°C. Vir: *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*, D. C. Giancoli, Prentice Hall, 1988.

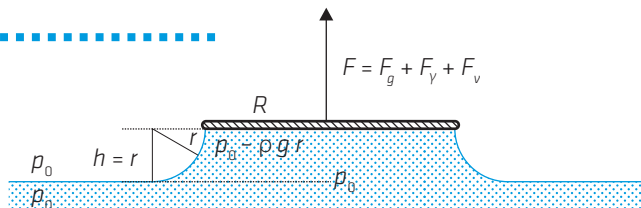




**Slika 4.** Sila  $F$  uravnesi težo plošče, silo površinske napetosti vode in težo vode, ki jo zgoščenko dvigne nad gladino vode v pladnju.



**Slika 3.** Prečko vlečemo s silo  $F$ , opna jo vleče v nasprotni smeri s silo  $2F_Y$ .



sreči, ker ima preveliko površinsko napetost in se vodna opna hitro strga). Če gibljivo stranico premaknemo za  $x$ , povečamo površino membrane za  $2lx$  (2-krat, ker ima opna dve površini, zgornjo in spodnjo). Pri tem opravimo delo  $A = Fx = 2\gamma lx$ , od koder vidimo, da smo prečko vlekli s silo  $F = 2\gamma l = 2F_Y$ , kjer je  $2F_Y$  sila milnice na prečko zaradi površinske napetosti milnice (spet 2-krat, ker ima dve površini, glej sliko 3).

Če imamo namesto zanke ploščo, prijemlje sila površinske napetosti le po njenem obodu (glej sliko 4).

Pri poskusu *Vodni svet* uporabimo zgoščenko s polmerom  $R = 6,0$  cm. Največja sila uteži na drugi strani enakoročnega vzvoda, ki še ne prevesi vzvoda, uravnesi težo zgoščenske, silo površinske napetosti vode in težo vode, ki jo zgoščenko dvigne nad gladino vode v pladnju. Sila površinske napetosti je  $F_Y = \gamma 2\pi R$ , teža zgoščenske in žic, na katerih visi, je  $F_g = 0,21$  N. Teža dvignjene vode je  $F_v = \rho g \pi R^2 h$ , kjer je  $\rho$  gostota vode  $1,0$  kg/dm<sup>3</sup>,  $g$  je težni pospešek  $9,8$  m/s<sup>2</sup> in  $h \approx 2,5$  mm je največja višina, do katere nam uspe dvigniti vodo pod zgoščenko. Izmerili smo, da je največja sila  $F$ , ki še ne odlepi zgoščenske od gladine čiste vode,  $0,54$  N. Kratek račun da oceno za površinsko napetost vode  $\gamma \approx 0,14$  N/m, kar je dvakrat prevelika vrednost. Napaka lahko izvira iz težko merljivega dviga vode  $h$  nad gladino. Če se voda dvigne za  $2,6$  mm (in ne  $2,5$  mm, kot smo upoštevali prej), je ocena za  $\gamma \approx 0,011$  N/m; če se dvigne za  $2,7$  mm, je  $\gamma \approx 0,08$  N/m, kar je zelo blizu dejanski vrednosti.

Ko vodi dodamo milo, se njena površinska napetost zmanjša. Največja izmerjena sila, ki ne odlepi plošče od gladine milnice, je zdaj  $0,32$  N, največja višina vode pa je  $\approx 1,5$  mm. Ker je sila na ploščo zaradi površinske napetosti milnice zdaj še manjša kot pri vodi in je podana kot razlika dveh precej večjih sil (teže

uteži in teže plošče in dvignjene milnice pod njo), zagrešimo pri oceni velikosti parametra  $\gamma_{mil}$  še večjo napako.

Kot si gotovo že opazil, je gladina vode ob stenah posode ukrivljena. Če voda stene omoči, je ukrivljena navzgor, če stene ne omoči, pa navzdol. Za približno oceno bo dovolj dobro, če si mislimo, da se gladina ob plošči prilega krožnici s polmerom  $r$  (glej sliko 4). Ker velja  $r \ll R$ , lahko drugo ukrivljenost gladine po obodu zaradi okrogle oblike plošče (s polmerom  $R$ ) zanemarimo. Gladina je ukrivljena, ker tlaka na obeh njenih straneh nista enaka. Na zunanji strani je tlak povsod enak zračnemu tlaku  $p_0 = 1$  bar. V vodi je na vodoravnici, vzporedni z ravnim delom gladine, in tik pod njo tlak enak zunanjemu tlaku 1 bar. Tik pod ploščo, je tlak v vodi enak  $p_0 - \rho g r$ . Ukrivljenost površine je povezana z njeno površinsko napetostjo in razliko tlakov z zvezo  $\Delta p = \gamma/r$ . Razlago zakaj je tako, najdemo v kakšnem učbeniku fizike. Ker je pri nas  $\Delta p = p_0 - (p_0 - \rho g r) = \rho g r$ , izenačimo  $\gamma/r = \rho g r$  in izrazimo  $\gamma = \rho g r^2$ . Ocenili smo, da se čista voda pod zgoščenko dvigne za največ  $2,5$  mm, od koder sledi  $\gamma \approx 0,062$  N/m. Milnica se dvigne kvečjemu  $1,5$  mm in odtod  $\gamma_{mil} \approx 0,022$  N/m.

### Sklopljeno nihanje

V poskusu *Svet gibanja* sta dve enaki nihali med seboj povezani z vzmetjo. Vsako nihalo posebej bi nihalo s svojim lastnim nihajnim časom  $t_0$ . Ker sta nihali enaki, sta tudi njuna lastna nihajna časa enaka. Ko pa sta nihali med seboj povezani, nihata povezano, sklopljeno. V splošnem je nihanje sklopljenih nihal kar zapleteno, razen če jih zanihamo na poseben način. Ker sta v našem primeru nihali dve, ju lahko zanihamo na dva posebno enostavna načina, ki ju imenujemo lastni nihanji. Prvo lastno nihanje vzbudimo, če obe nihali enako izmaknemo v isto stran (obe enako v desno ali obe enako v levo) in hkrati spustimo. Pri





takem nihanju se vzmet, ki ju povezuje, nič ne razteza in krči ter nič ne vpliva na nihajni čas, ki je zato enak nihajnemu času enega nihala,  $t_1 = t_0$ .

Drugo lastno nihanje pa vzbudimo, če obe nihali izmaknemo v nasprotnih smereh (na primer prvo v desno, drugo v levo) ter ju hkrati spustimo. Ker sta nihali povezani z vzmetjo, se ta pri nihanju razteza ter s tem vpliva na nihanje in tudi na nihajni čas  $t_2$ , ki je v tem primeru krajši od nihajnega časa enega nihala,  $t_2 < t_0$ .

Če zanihamo nihali tako, da vzbudimo bodisi prvo bodisi drugo lastno nihanje, nihata na tak način kar naprej (dokler se sčasoma zaradi upora zraka in trenja ne ustavita). Lahko pa seveda nihanje vzbudimo še drugače, na primer tako, kot pri poskusu *Svet gibanja*. Prvo nihalo izmaknemo, drugo pa pridržimo v mirovni legi. Hkrati ju spustimo in opazujemo nihanje. Najprej niha le prvo nihalo, potem zaniha še drugo nihalo. Prvo niha z vedno manjšo amplitudo, drugo pa z vedno večjo. Prvo nihalo se v nekem trenutku ustavi, niha le drugo. Potem se zgodba ponovi še večkrat, nihanje se med nihalom preko vzmeti prenaša sem in tja, pojavu pravimo utripanje.

Ob utripanju se vzmet neprestano razteza in krči ter ob tem deluje na nihali s spreminjajočo se silo. Čas od trenutka, ko eno od nihal obmiruje, do trenutka, ko obmiruje naslednjič, imenujemo utripalni čas  $t_u$ . Zanj velja zveza  $\frac{1}{t_u} = \frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1}$ , ali, če jo zapišemo raje s frekvenco, ki je obratna vrednost nihajnega časa,  $\nu_u = \nu_2 - \nu_1$ . Število utripov v sekundi  $\nu_u$  je kar enako razliki med številoma nihajev v sekundi pri prvem in drugem lastnem nihanju. Utripanje lepo opazimo, če je utripalni čas dovolj dolg oziroma utripalna frekvenca  $\nu_u$  majhna. Ta pogoj je izpolnjen, ko se lastni frekvenci malo razlikujeta, to pa je tedaj, ko je vzmet, ki ju povezuje, šibka in ju zato le malo moti. Tedaj rečemo, da sta nihali šibko sklopljeni.

### ■ Dodatno branje

Veliko zanimih posledic površinske napetosti in poskusov, ki kažejo nanje, je opisanih (v angleščini) na številnih spletnih straneh, na primer:

- [http://www.funsci.com/fun3\\_en/exper2/exper2.htm](http://www.funsci.com/fun3_en/exper2/exper2.htm)
- [http://www.online-tensiometer.com/oberfl/experiments\\_st.html](http://www.online-tensiometer.com/oberfl/experiments_st.html)
- [http://www.woodrow.org/teachers/bi/1998/waterstrider/student\\_lab.html](http://www.woodrow.org/teachers/bi/1998/waterstrider/student_lab.html)

in še množici drugih. O nihanju, sklopljenem nihanju in posledicah površinske napetosti vode si lahko prebereš tudi v Veselih šolah v 21. številki revije Pil Plus in 9. številki revije Pil, oboje letnik 2004/05. O površinski napetosti piše A. Kodre v 4. številki Preseka, letnik 1996/97, v članku z naslovom *Milni mehurčki na snegu*.

