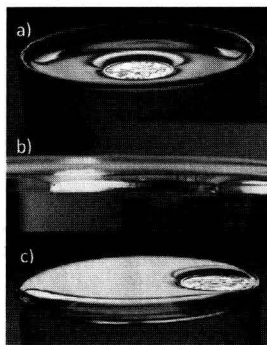




Novčić koji zna plivati

Ivica Aviani¹, Zagreb

Pokus. U čašu nalijmo vode skoro do vrha. Potpuno suh aluminijski novčić od 1 ili 2 lipe položimo na vilicu i pažljivo ga horizontalno spustimo na površinu vode. Novčić kojemu je gustoća 2.7 puta veća od gustoće vode "pliva", zapravo pluta na vodi (slika 1.a)! Kako to, kad znamo da tijela veće gustoće od gustoće vode tonu?! Čačkalicom pažljivo guramo sredinu novčića prema dolje. Osjećamo povratnu silu, kao da napinjemo elastičnu membranu! Primjećujemo da novčić uvijek zauzima položaj u sredini čaše dok nije puna, a ako čašu prepunimo, tako da voda samo što se ne prelije, novčić se postavlja uz rub (slika 1.c). Ovaj pokus možete izvesti svojim prijateljima i poznanicima kao zanimljiv trik, ali ako vas zanima zašto se sve tako događa, zašto novčić pluta, zašto kukci mogu hodati po vodi, a čovjek ne može, čitajte dalje.



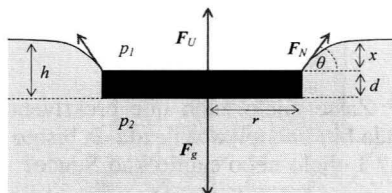
Slika 1. Novčić od 2 lipe pluta na površini vode:
a) ako čaša nije puna novčić zauzima položaj u sredini čaše;
b) cijeli novčić je ispod razine vode;
c) ako je čaša prepuna novčić zauzima položaj uz rub.

Zašto novčić pluta? Površina vode ponaša se kao napeta membrana, kao površina napuhanog balona. Stavljanjem novčića na površinu vode napravili smo rupu u toj membrani. Zbog površinske napetosti ova se rupa nastoji proširiti baš kao rupa na napuhanom balonu, ali privlačne sile adhezije između molekula vode i novčića to ne dozvoljavaju. Kao da smo na balonu probili rupu, a onda je zakrpali ljepenkom – novčićem. Površinska napetost $\gamma = F_N / l = W / \Delta S$ je sila F_N po duljini l presjeka površine ili rad W potreban za povećanje površine ΔS . Za slobodnu površinu vode otvorenu prema zraku ona iznosi 72 mN/m ili 72 mJ/m^2 . U našem slučaju napetost djeluje po obodu novčića od 2 lipe promjera $2r = 19 \text{ mm}$, debljine $d = 1.2 \text{ mm}$, tangencijalno na površinu vode, pod kutom od oko $\theta = 30^\circ$ (vidi sliku 2). To rezultira silom čija vertikalna komponenta prema gore iznosi $F_N = 2r\pi\gamma \sin \theta = 2.1 \text{ mN}$. Također, novčić je uronjen u vodu pa ga pridržava i uzgon. Koristeći formulu $F_U = \rho Vg$, gdje je $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ gustoća vode, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ akceleracija slobodnog pada, a $V = 0.34 \text{ cm}^3$ obujam novčića, lako izračunamo silu uzgona koja je jednaka $F_U = 3.3 \text{ mN}$. Da bi novčić plivao sila teža $F_g = mg$ mora biti jednaka zbroju sila F_N i F_U . Uz masu novčića $m = 0.92 \text{ g}$ nalazimo, međutim, da je sila teža $F_g = 9 \text{ mN}$, znatno veća od zbroja $F_N + F_U = 5.4 \text{ mN}$. Očito da sile koje smo uzeli u obzir nisu dostatne da novčić održe na površini.

Jesmo li dobro računali silu uzgona? Pažljivo pogledajmo odraz površine vode uz novčić. Površina je uleknuta i to toliko da je gornja ploha novčića ispod razine vode. To se još bolje vidi pogledom sa strane. Jesmo li pravilno računali silu uzgona? Očito

¹ Autor je znanstveni suradnik na Institutu za fiziku u Zagrebu.

nismo! Uzgon nastaje zbog razlike između tlakova p_1 na gornjoj i p_2 na donjoj strani novčića, što rezultira silom uzgona $F_U = (p_2 - p_1) \cdot r^2 \pi$. Na donjoj strani novčića tlak je veći za iznos hidrostatskog tlaka ρgh , te vrijedi $F_U = \rho gh \cdot r^2 \pi$, pri čemu je h dubina na kojoj se nalazi donja strana novčića. Primjećujemo da je dubina h otprilike dvostruko veća od debljine novčića, pa za iznos sile uzgona dobivamo približno dvostruko veću vrijednost $F_U = 2\rho gV = 6.6 \text{ mN}$, dovoljnu da objasnimo zašto se novčić održava na površini. Guramo li novčić prema dolje, silu kojom djelujemo očito uravnotežuje povećani uzgon.



Slika 2. Prikaz osnovog presjeka novčića sa slike 1.b, koji pluta na površini vode. Novčić održavaju sile napetosti vodene površine F_N i uzgona F_U .

Zašto voda ne prekrije novčić? Površina vode s gornjom plohom novčića zatvara kontaktni kut (kut močenja) θ , karakterističan za aluminij. Ovaj kut određen je omjerom napetosti površine vode γ_{Al} u kontaktu s aluminijem i napetosti slobodne površine vode, tako da vrijedi $\cos \theta = \gamma_{Al} / \gamma$. Razina vode oko našeg novčića je za x iznad gornje plohe novčića. Zato očekujemo da voda prekrije novčić, popuni uleknuće na površini i tako smanji svoju potencijalnu energiju za $\rho x S g x / 2$, gdje je $\rho x S$ masa vode koja popuni uleknuće, a $x / 2$ prosječna visina uleknuća. Međutim, to je energetski nepovoljno jer voda istodobno mora povećati svoju slobodnu površinu za iznos jednak ploštini novčića S , za što je potreban rad γS . Zbog privlačnih sila adhezije, koje potpomažu prekrivanje novčića, ovaj rad je umanjen za $\gamma_{Al} S$, rad potreban za povećanje površine vode u kontaktu s novčićem. Voda će prekriti novčić tek za $x = x_M$, kada smanjenje potencijalne energije, zbog popunjavanja uleknuća, postane dostatno radu potrebnom za povećanje površine, tako da vrijedi $\rho g (x_M)^2 S / 2 = \gamma S - \gamma_{Al} S$. Iz ove jednadžbe dobivamo maksimalnu moguću vrijednost visine vode iznad novčića $x_M = \sqrt{2(1 - \cos \theta) \gamma / \rho g}$. U našem slučaju račun daje $x_M = 2.7 \text{ mm}$. Budući da je za naš novčić visina x manja od x_M prekrivanje novčića se ne događa spontano nego tek ako zatresemo čašu ili gurnemo novčić dublje.

Zašto kukci mogu hodati po vodi, a čovjek ne? Nožice nekih kukaca su supervodoodbojne, ne moče vodu. U tom slučaju je $\theta = 180^\circ$, odnosno $\cos \theta = -1$ i imamo maksimalno moguće udubljenje vode jednako $x_M = 2\sqrt{\gamma / \rho g} = 5.4 \text{ mm}$. To je više nego dovoljno da podnese težinu kukca i sasvim nedovoljno da podnese težinu čovjeka. Pogledajmo primjer. Ako čovjek ima masu 60 kg i površinu cipele 3 dm^2 , tlak kojim pritišće podlogu jednak je $2 \cdot 10^4 \text{ Pa}$. To odgovara hidrostatskom tlaku vode na dubini od 2 m . Znači, da bi čovjek hodao po vodi, oko njega bi trebao biti vodeni zid visok 2 m , a najviše je moguće postići samo 5.4 mm .

Zašto novčić zauzima sredinu čaše? Zbog površinske napetosti voda nastoji poprimiti oblik u kojem je njena površina najmanja. Pogledajmo kakav je oblik vodene površine u čaši. Uočavamo da se voda na rubu čaše uzdiže uz staklo. Zbog toga je cijela površina vode u čaši malo udubljena i najniže mjesto je u sredini. Površina će biti najmanja ako se uleknuća, odnosno uzdignuća postave međusobno što bliže. Zato novčić sa svojim uleknućem zauzima najniži dio vodene površine, odnosno sredinu čaše. Ako čašu prepunimo, tako da voda samo što se ne prelje, vodena površina je ispupčena, a najniži dio je uz njen rub. Zato novčić odlazi na rub.