Okrenuta čaša i tlak zraka

Sažetak: Kao ilustracija za "Tlak zraka", često se izvodi pokus s okrenutom čašom punom vode i odozdol priljubljenim komadom papira. Uz pokus se daje uglavnom kvalitativno objašnjenje. Postoji međutim, niz inačica istog pokusa kojima se pojava može relativno jednostavno opisati preko Boyle-Mariotteovog zakona. **Članak se temelji na opisu i mjerenjima koja su proveli Andreas Heithausen i Konrad Arnolds, sa Instituta za Fiziku i njenu Didaktiku sveučilišta u Köln-u**

Priredio: Hrvoje Mesić

1. Uvod

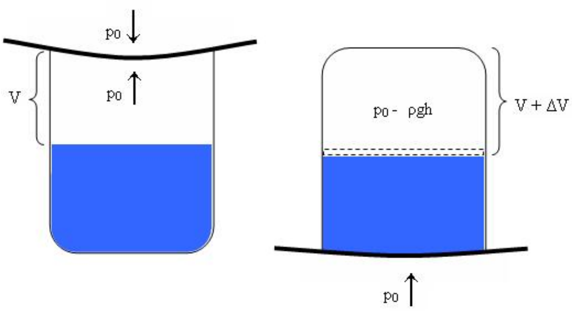
Omiljeni pokus uz temu tlaka zraka sastoji se od staklene čaše, do ruba napunjene vodom koja se poklopi tankim kartonom (npr. razglednica) i zatim okrene naopako. (***Sl. 0***.) Na pitanje hoće li razglednica otpasti ili će ostati priljubljena uz otvor čaše, neće se instinktivno uvijek dobiti točan odgovor, čak niti od fizičara koji ne poznaju pokus. Kao što lako možemo pokazati razglednica ostaje priljubljena, (Sl. 2).[1]

Uobičajeno objašnjenje pokusa glasi „…da je tlak zraka koji djeluje odozdol mnogo veći nego tlak stupca vode u čaši!“. Općenito se zna da tlak zraka na razini mora odgovara u prosjeku tlaku stupca vode visine približno 10 m. Budući da je razglednica pritisnuta uz čašu tako velikim vanjskim tlakom zraka ona može držati mali stupac vode u čaši. U literaturi su opisane izvedbe pokusa sa stupcima vode i do 2 m visine, koje drži priljubljena pločica.

Pođemo li od ove tvrdnje pokrovna pločica za čašu polumjera r = 2,5 cm morala bi prema tome, kad se zanemari tlak vode, uz prihvaćeni tlak zraka od $\boldsymbol{\rho}$ = $1{,}013 \cdot 10^5$ Pa biti u stanju izdržati opterećenje na povlačenje od

$$F = p\pi r^2 = 199N$$

tj. gotovo 200 N. A to odgovara težini mase od 19,9 kg, koju bi, nakon odbitka mase same pločice, morali moći objesiti na pločicu. Međutim pločica se dade relativno lako ukloniti, a maksimalni tereti koje ona može podnijeti su više od 10 puta lakši nego što se teoretski dobiva, stoga objašnjenje o puno većem tlaku izvana, ostaje i dalje upitno.



Ima dosta učenika koji sumnjaju da voda nekako "zalijepi" razglednicu odnosno pločicu za čašu, tj. da je za tu pojavu odgovorna ***adhezija*** između razglednice, vode i ruba čaše. Konačno, suhu razglednicu ne možemo jednostavno pritisnuti s donje strane stola ili kakvog ormarića pa da ona ostane priljubljena. Zato bez daljnjih dokaza objašnjenje pomoću tlaka zraka ostaje još uvijek samo nagađanje.

[1] Da se omoguće dodatni pokusi razglednica (tanki karton) je zamijenjena krutom pločicom od pleksiglasa.

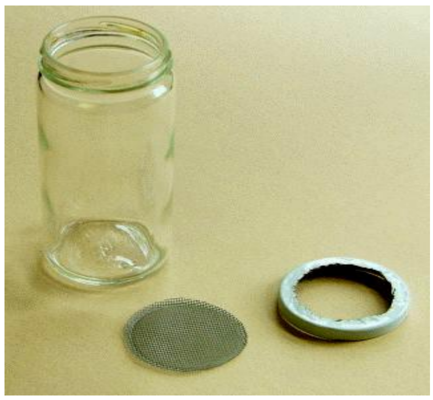
Pokazat ćemo da se pojava može relativno jednostavno kvantitativno opisati pomoću Boyle-Mariotteovog zakona.

2. Jednostavan pribor za izvođenje pokusa

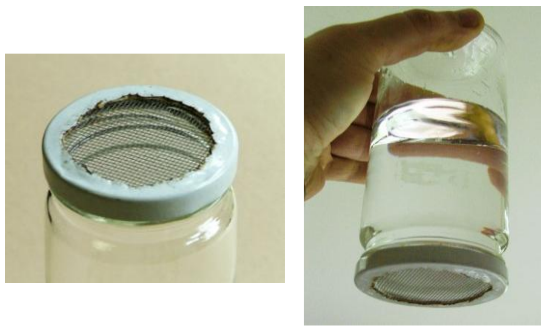
Najprije treba ispitati **koju zadaću u ovom pokusu ima razglednica**. Bez „krute granice“ između vode i zraka voda bi naravno iscurila. Ali koju funkciju konkretno ovdje vrši razglednica?

U svrhu daljnjeg istraživanja, dobro može poslužiti obična staklenka za konzerviranje s navojnim poklopcem (vidi Sl. 1). Na poklopcu treba načiniti veliki kružni otvor, koji možemo prekrivati mrežicama različitih veličina oka.

Sl. 1: *Staklenka s poklopcem u kojem je izrezan otvor i mrežice različite veličine oka*

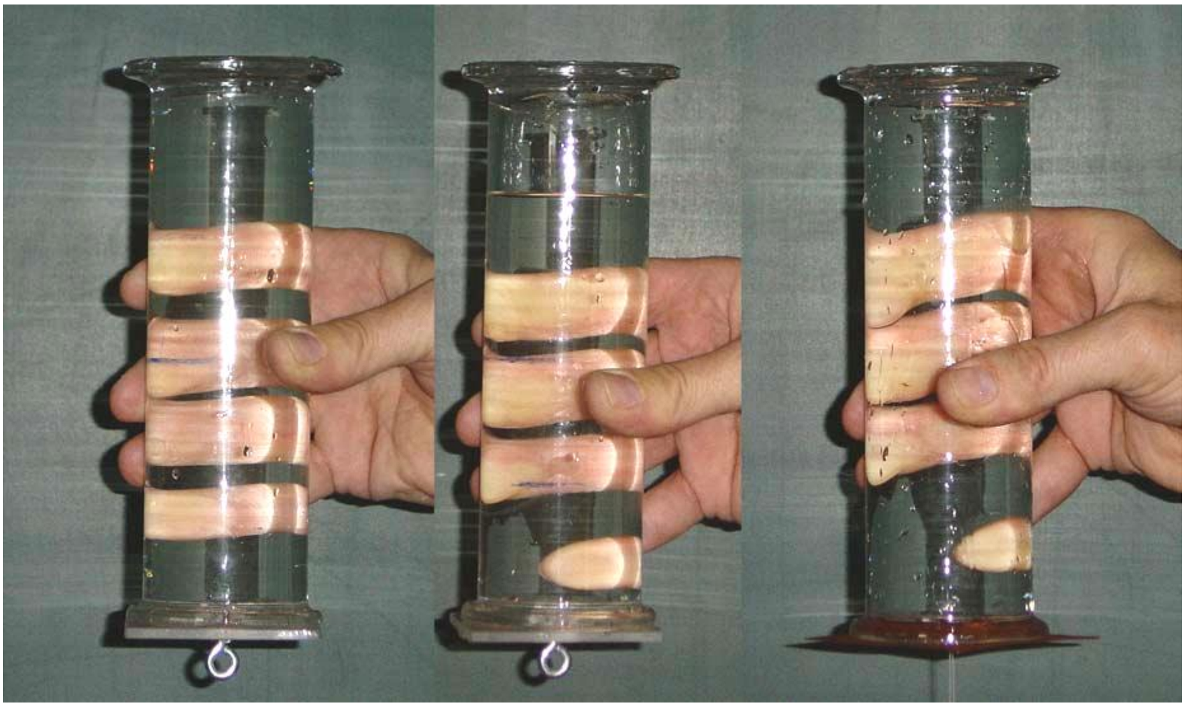


Sada u staklenku nalijemo vodu, i to kroz mrežicu; pokrijemo dlanom i okrenemo, uklonimo dlan i voda na čuđenje promatrača ne istječe (vidi Sl. 2).



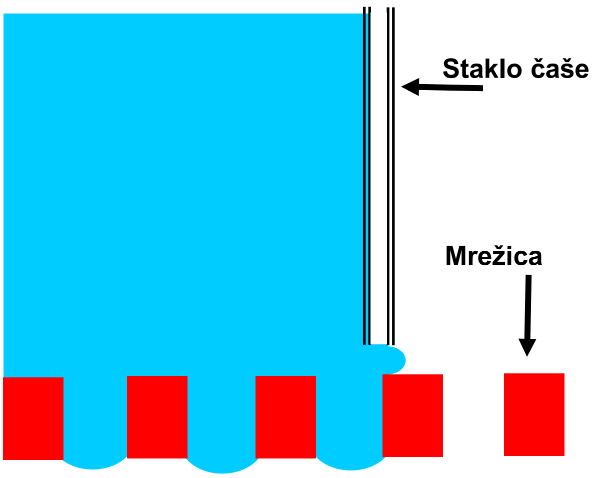
Sl. 2: *Iz staklenke koja je poklopljena žičanom mrežicom, ne istječe voda.*

U ovoj izvedbi pokusa, zbog navojnog poklopca, adhezija između razglednice, vode i ruba stakla ne igra nikakvu ulogu.



Sl. 3: *Inačice pokusa s okrenutom čašom,* lijevo*: cilindar posve napunjen vodom poklopljen pločicom od pleksiglasa;* u sredini*: djelomično napunjen cilindar;* desno*: cilindar poklopljen mrežicom.*

Relativno jednostavno možemo ispitati do koje veličine oka mrežice će se voda zadržavati (to ćemo u poglavlju **7.** i računski pokazati). Osim što možemo ispitivati metalne i plastične mrežice, možemo mrežicu zamijeniti nekim drugim materijalom koji inače propušta vodu. U našim pokusima voda je mogla istjecati kod mrežice veličine oka od 2 mm, dok ju je mrežica oka 1mm još uvijek zadržavala.
Mrežica i razglednica dakle ***služe da se stabilizira površina vode***. Kod mrežice s velikom širinom oka površina vode je toliko nestabilna da se mogu stvoriti mjehurići zraka, koji se penju, i omogućuju istjecanje vode.



Sl. 4: *Shematski prikaz stabiliziranja površine vode pomoću mrežice i napetosti površine.*

.

Ako se preko gušće mrežice, koja drži vodu, prođe prstom, mogu se primijetiti malene kapljice vode koje otpadaju s mreže, a mjehurići zraka se istodobno penju u čaši. Tako se može dobro istražiti i utjecaj površinske napetosti (Sl. 4).

3. Varijacija pokusa

Da bismo provjerili je li tlak zraka uzrok držanja razglednice odnosno pokrovne pločice, možemo pokus izvesti u sljedećoj modifikaciji. Naime, do efekta dolazi i kada čaša nije potpuno napunjena vodom (Sl. 3., sredina). I u tom slučaju razglednica ne pada, ali objašnjenje više nije tako jednostavno. Zapravo pokus u ovoj verziji ne bi ni trebao uspjeti. Ako pretpostavimo da je tlak zraka u čaši p_{unutra} jednak atmosferskom tlaku p_{vani} što se na prvi pogled čini uvjerljivo, morala bi zbog nejednadžbe

(1)

$$p_{unutra} + p_{voda} = p_{vani} + p_{voda} > p_{vani}$$

razglednica pasti i voda isteći. Kako do toga ne dolazi, očito je pretpostavka $p_{unutra} = p_{vani}$ pogrešna.

U knjigama se nastali efekt objašnjava uglavnom činjenicom da prilikom preokretanja čaše nešto vode isteče, ali u čašu ne ulazi zrak pa se tlak zraka u čaši smanjuje. Osim toga razglednica je savitljiva i kod laganog pritiska prilikom njenog postavljanja smanji se volumena zraka u čaši; nakon preokretanja razglednica se vraća u prijašnji položaj i nakon čega se tlak zraka u čaši smanji.
Da se to eksperimentalno provjeri, možemo najprije razglednicu zamijeniti nesavitljivom pločom od pleksiglasa. Time će se izbjeći smanjivanje volumena zraka u čaši prilikom postavljanja. K tome se ploča

može osušiti, što omogućava procjenu količine vode istekle nakon okretanja. I zaista, ovisno o razini vode u čaši, određeni dio vode isteče. Međutim, intuitivno bi se ta količina mogla proglasiti premalenom da bi se zbog toga unutrašnji tlak zraka toliko smanjio da vanjski atmosferski tlak može uravnotežiti stupac vode. Zato ima smisla najprije napraviti procjenu potrebne promjene volumena.

4. Procjena potrebne promjene volumena i tlaka

Za izračun svih tlakova koji djeluju na razglednicu poslužit ćemo se najprije Boyle – Mariotteovim zakonom:

$$pV = const = (p + \Delta p)(V + \Delta V) \tag{2}$$

Prema njemu se pri stalnoj temperaturi relativna promjena tlaka odnosi prema promjeni volumena na sljedeći način:

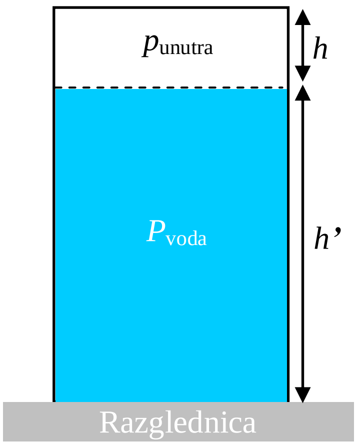
$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{-\Delta V}{V + \Delta V} \tag{3}$$

Povećanje volumena prema tome za posljedicu ima smanjenje tlaka.
Sada s V označimo volumen zraka u čaši, a sa p njegov tlak. Za početak želimo izračunati minimalno povećanje volumena potrebno da bi vanjski tlak zraka mogao uravnotežiti tlak zraka unutar čaše i hidrostatski tlak stupca vode, tako da voda ne istječe iz djelomično napunjene čaše. Mora vrijediti

$$p_{voda} \leq -\Delta p \tag{4}$$

ili

$$\frac{p_{voda}}{p_{vani}} \leq \frac{-\Delta p}{p_{vani}} = \frac{\Delta V}{V + \Delta V} \tag{5}$$



***Slika 5:** Shematski prikaz mjernih parametara*

Odnos promjene volumena i volumena zraka u čaši mora prema tome biti približno odgovarati odnosu hidrostatskog tlaka stupca vode i atmosferskog tlaka. Kako normalni atmosferski tlak odgovara tlaku stupca vode od oko deset metara, mora se kod stupca od 10 cm volumen zraka povećati za otprilike 1 %. Dakle, ako je visina zraka u čaši jednaka h = 5 cm, morala bi se ploča spustiti za 0,5 mm, što je prilično teško mjerljiv efekt.
Međutim, prema jednadžbi (5) eksperimentalni dokaz bi trebao biti lakši za veće stupce, na primjer ako uzmemo cijev duljine 1 m. Napunimo li takvu cijev vodom do visine 90 cm, a ostavimo 10 cm zraka, trebala bi se ploča spustiti za 0,9 cm da bi se volumen toliko povećao, a da tlak padne na odgovarajuću vrijednost. Trebala bi prema tome isteći i mjerljiva količina vode. Slika 6 ilustrira taj pokus.

5. Mjerenje promjene volumena

Da bismo nastalu promjenu volumena kvantificirali i usporedili s predviđanjima, napravili smo seriju mjerenja s cijevi od pleksiglasa duljine 1 m, unutarnjeg promjera 4,4 cm (Sl. 6.). Na jednoj strani cijevi bila je zatvorena zalijepljenom pločom od pleksiglasa. Cijev smo napunili vodom do određene visine, otvoreni kraj pokrili drugom pločom od pleksiglasa i sve okrenuli za 180°. Ploču smo pri tom držali rukom. Laganim popuštanjem pritiska na ploču puštali smo vodu da kaplje iz cijevi sve dok ploča ne bi počela visjeti sama bez potrebe za držanjem. Pri tome smo posebno pazili da u cijev ne uđu mjehurići zraka, koji bi pokvarili mjerenje. Kada smo cijev ponovno okrenuli preostali volumen vode smo usporedili s početnim volumenom. Razlika dviju

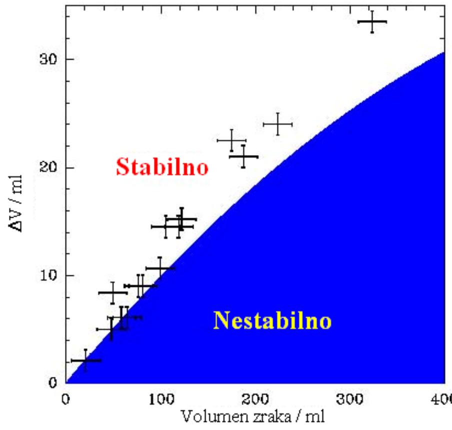
vrijednosti odgovara traženom ΔV.

***Slika 6:** Čak i kod cijevi duljine 1m, koja je samo djelomično ispunjena vodom, zadržava se pločica koja je samo priljubljena uz donji otvor cijevi.*

Slika 7 prikazuje rezultat mjerenja u usporedbi s predviđanjem po jednadžbi 5. Hidrostatski tlak je pri tome računat na slijedeći način:

$$p_{voda} = \frac{m_{H_2O}g}{\pi r^2} = \rho_{H_2O}gh' \qquad (6)$$

gdje je ***h'*** visina stupca vode, a $\boldsymbol{\rho}$ gustoća vode (vidi Sl. 5). Za vrijeme naših mjerenja atmosferski tlak



Slika 7: *Potrebna promjena zapremine u ovisnosti o zapremini zraka kod cijevi duljine 1m i promjera 4,4 cm. Plavo polje ispod krivulje označava nestabilno područje, gdje priljubljena pločica ne ostaje nego pada. Kod vrijednosti iznad krivulje pločica se zadržava, što se pokazuje mjernim vrijednostima (križići).*

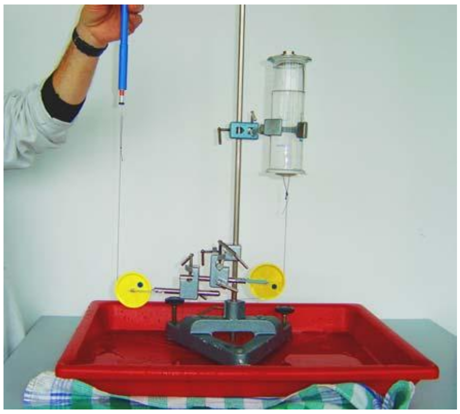
je pao s 1015 hPa na 1011 hPa, što je promjena od 0,4 %, pri čemu smo za tlak zraka uzeli 1013 hPa. Sve izmjerene vrijednosti leže iznad krivulje koja dijeli stabilno (bijelo) od nestabilnog (plavo) područja.
Pri diskusiji tog grafa treba naglasiti da se ucrtana krivulja zasniva na *ne*jednadžbi (5.). Naime, stabilno stanje se dobiva i ako promjena volumena ΔV ispadne veća. Mjerene vrijednosti zato ne bi trebale biti ravnomjerno razasute oko krivulje, nego bi sve trebale ležati iznad nje, i to unutar pogreške mjerenja. To je zaista tako i izmjereno.

6. Mjerenje sile pritiska

Kako bismo mogli ocijeniti silu koja drži ploču prislonjenu uz cijev, pokus je modificiran. Uz pomoć aparature na Sl. 8. kvantitativno smo mogli odrediti nastalu silu. U tu svrhu je 20 cm visoka menzura, najprije u uspravnom položaju, napunjena vodom do određene visine, okrenuta i postavljena na stalak. Poklopac (pločica) od pleksiglasa, na koji je točno u središte ugrađena kukica s koncem, bio je prilikom okretanja čvrsto pritisnut uz cijev. Konac je bio proveden preko kolotura i vezan na dinamometar.

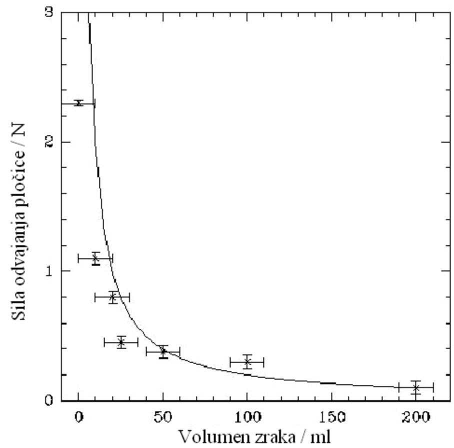
Sl. 8a

Pri izvođenju pokusa posebno smo pazili da menzura bude zaista uspravno pričvršćena (što je provjeravano malom libelom na otvoru cilindra), i da je ploča od pleksiglasa dobro centrirana. Osim toga, konac je vukao ploču točno okomito prema dolje, da se izbjegnu momenti zakretanja pločice. Treba još istaknuti da je ploča bila jednostavno prislonjena uz donji rub menzure tj. nije korišteno nikakvo dodatno brtvljenje, kao na primjer silikon.



Slika 8: *Eksperimentalna izvedba za mjerenje sile, na pločicu prislonjenu uz menzuru.*

Slika 9 prikazuje silu potrebnu da se ploča odvoji od cijevi u ovisnosti o volumenu zraka zarobljenog u cijevi. Za taj pokus korištena je menzura volumena 400 mL. Njen unutarnji promjer bio je 5 cm, a masa pločice je bila 24 g.
Izmjerene vrijednosti prilično variraju; one jako ovise o tome vučemo li ploču točno okomito u odnosu na njenu ravninu i nalazi li se ploča točno u središtu. U suprotnom nastaju okretni momenti koji smanjuju potrebnu silu.



Slika 9: *Maksimalna vučna sila na pločicu u ovisnosti o zarobljenoj zapremini zraka. Povučena krivulja daje prema jednadžbi 7 očekivani tok za slučaj kada se zapremina zraka povećavala u koracima od 0,1 ml.*

Kao što smo već spomenuli u uvodu, ovdje je interesantno što je vrijednost za zanemarivo mali volumen zraka samo 2,3 N, a ne 199 N, što bi se očekivalo kod cilindra promjera 5 cm. To je posljedica prisutnosti plinova u vodi, od kojih je vjerojatno ugljični dioksid najveći krivac zbog svoje velike topljivosti.
Da bismo barem kvalitativno dokazali tu pretpostavku, pokus je provođen s vodom u kojoj su

bile otopljene različite količine plinova. Najprije je voda stavljena pod vakuumsko zvono, i vakumirana da bi plinovi izašli. Kad je pokus rađen s tom vodom, kritična sila bila je 4 N. Nakon toga je eksperiment proveden s gaziranom vodom. U tu svrhu je upotrijebljena komercijalno dostupna gazirana mineralna voda koja je sadržavala oko 300 mg/L ugljikovog dioksida. Kako bi se spriječilo stvaranje mjehurića plina koji bi pokvarili mjerenje voda je prije provođenja pokusa stajala toliko dugo dok se na boci više nisu javljali mjehurići. U ovoj varijanti pokusa kritična je sila bila znatno ispod 1 N.

Kako tlak zraka djeluje sa svih strana, a ne samo odozdo, eksperiment bi morao funkcionirati i ako cijev okrenemo i ploču od pleksiglasa vučemo prema gore. U tom je slučaju sila potrebna za odvajanje ploče od cilindra iznosila 6,3 N uz potpuno napunjen cilindar To je konzistentno s vrijednošću iz prethodnog mjerenja, 2,3 N, ako uzmemo u obzir doprinos mase stupca vode od 400 g.

Očekivana ovisnost kritične sile i volumena zraka u cijevi može se izvesti iz sljedećeg razmišljanja: istjecanjem vode prije potezanja pločice, sile koje djeluju na ploču su u ravnoteži. Djelovanjem dodatne sile mora se dakle povećavati volumen zraka u cilindru. Pri tome jednaka *apsolutna* promjena volumena uzrokuje veću *relativnu* promjenu kod manjeg nego kod većeg volumena. Sila koju treba upotrijebiti, da se pločica odvoji od cijevi, je zato za manji volumen veća, točnije (jedn. 5):

$$F = \frac{\Delta V}{V + \Delta V} p_{vanjski} A \qquad (7)$$

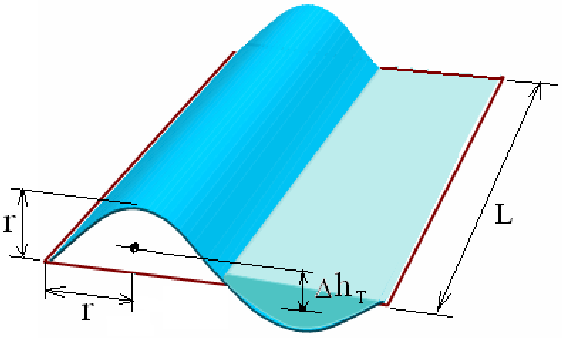
Jedini slobodni parametar u toj jednadžbi je ΔV. Mijenjajući ΔV možemo krivulju približiti mjerenim vrijednostima. U našem slučaju je ispalo ΔV=0,1 ml (vidi Sl. 9). Pri površini od A=19,6 cm^2 to daje pomak ploče od samo 0,05 mm.

Zanimljivo je da je promjena volumena neovisna od volumena vode ili zraka u čaši. To možemo objasniti površinskom napetošću vode: najprije ona sprječava stvaranje zračnih mjehurića na mjestu dodira cilindra i ploče. Tako zrak izvana ne može ulaziti u cijev, što bi uzrokovalo odvajanje ploče. Spustimo li međutim ploču za navedeni iznos, puca površina na mjestu gdje se dodiruju cijev i ploča, zrak ulazi u cijev i ploča se odvaja.

7. Stabilnost površine

Pogledajmo može li se držati okrenuta posuda s vodom ako otvor nije pokriven krutom granicom kao što je karton, papir ili pleksiglas. To smo već izvodili s mrežicom, a sada ćemo izračunati koliki može biti najveći otvor i o čemu to ovisi, a da voda ne iscuri. Vrlo čest primjer za to, su različite bočice za parfeme ili losione poslije brijanja. ***Sl.10.*** Te bočice imaju takve otvore da ih treba bočicu malo potresati ako želimo izliti tekućinu iz njih. Potresanjem narušavamo stabilnost površine koja svojom napetošću održava granicu između zraka i tekućine i ne dopušta ulazak zraka.

Radi jednostavnosti uzet ćemo u razmatranje otvor pravokutnog oblika kakav čine oči na mrežicama.



Ako zaljuljamo površinu stvorit će se na njoj neki valni oblik koji ćemo, opet zbog jednostavnosti, zamisliti kao plašt poluvaljka prikazan na ***Sl. 11.*** Doći će zbog toga do spuštanja težišta premještenog dijela tekućine. Istodobno se napinje površina i u nju se pohranjuje elastična energija. To rastezanje površinske opne ima međutim svoje granice nakon čega se površina kida i zrak ulazi u posudu.

Premješteni volumen tekućine smatrat ćemo približno poluvaljkom polumjera *r*, a visine L. Potencijalna energija spuštenog poluvaljka iznosi:

$$mgh = \rho_{H_2O} V g \Delta h_T$$

Gdje je $h_T = 4r/3\pi$ visina težišta poluvaljka u odnosu na ravnu površinu, pa je težište spušteno za dvije takve visine.

$$\Delta E_{pot} = \rho_{H_2O} \frac{1}{2} r^2 \pi L g \, 2 \frac{4}{3} \frac{r}{\pi} = \frac{4}{3} \rho r^3 g L$$

Površina ima energiju jednaku radu potrebnom za njeno rastezanje uzimajući u obzir koeficijent napetosti α:

$$W_1 = \alpha S_1 = \alpha 4 r L;$$

$$W_2 = \alpha S_2 = \alpha 2 r \pi L$$

Razlika energije napetosti površine iznosi:

$$\Delta W = W_2 - W_1 = \alpha 2 r L (\pi - 2)$$

Sad izračunajmo ukupnu promjenu energije

$$\Delta E_{UK} = \alpha 2 r L (\pi - 2) - \frac{4}{3} \rho r^3 g L$$

Tu razliku deriviramo po r i odredimo maksimalnu vrijednost izjednačavanjem prve derivacije s nulom.

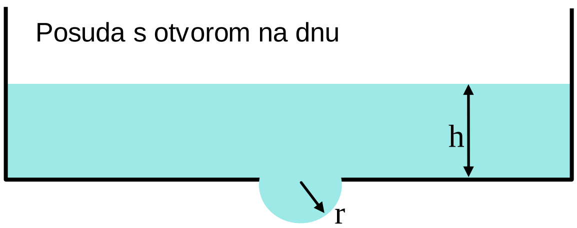
Dobivamo da za valni poremećaj veći od

$$r = \sqrt{\frac{\pi - 2}{2}}\sqrt{\frac{\alpha}{\rho g}}$$

površina ne bi izdržala naprezanje pa nam to daje i parametar najvećeg otvora iz kojeg tekućina neće istjecati iako nije ničim pokriven.
Naime kod pokusa s krutom pločicom jedan dio tekućine „izviri“ između ruba čaše i pločice. Na taj se način „vodeni klip“ spusti i rastezanjem poveća zapreminu zraka u čaši kako bi tlak pao i dođe do ravnoteže s vanjskim tlakom. Ako na tu vodu koja izviruje kapnemo malo deterđenta površina se kida i pločica otpada.

8. Kazna za Danaide, kćeri Danajeve

Starogrčki mit o Danaidama, (Danajevim kćerima) kaže da su one za kaznu morale dovijeka grabiti vodu sitom i puniti posudu s otvorom na dnu. Čini se kao „nemoguća misija“. Istina je da se posuda s otvorom na dnu ne može nikada napuniti ali bi se s fizikalnog stanovišta u njoj ipak moglo držati nešto vode.
Naime, zanimljivo je kako stabilnost površine omogućuje držanje određene količine tekućine u otvorenim posudama koje na dnu imaju rupu ***Sl. 12.*** (za razliku od okrenute čaše koja je odozgo zatvorena). Tako se primjerice voda može držati i u situ dovoljno guste mrežice.



Površina tekućine na dnu posude i na mjestu otvora se zakrivi i oblikuje kapljicu kao što prikazuje crtež. Zbog površinske napetosti ta kap, stvorena preko otvora, drži u ravnoteži tlak stupca tekućine u posudi. Ako uzmemo da je polumjer otvora jednak polumjeru kapi, onda je tlak jednak p = 2α/r, gdje je α koeficijent površinske napetosti. Iznos sile kojom ovaj tlak djeluje na kap okomito prema gore dobije se množenjem tlaka i površine otvora:

$$F = p \cdot S = \frac{2\alpha}{r}\pi \cdot r^2 = 2\pi \cdot r \cdot \alpha$$

Sve dok je iznos ove sile veći od težine stupca tekućine iznad otvora, tekućina neće istjecati. Znači, da treba biti zadovoljena nejednadžba $F \geq mg$, odnosno:

$$2\pi \cdot r \cdot \alpha \geq \rho g h S = \rho g h r^2 \pi$$

Iz ove nejednadžbe dade se izračunati maksimalna razina vode u posudi ovisno o promjeru rupice na dnu

$$h_{\max} = \frac{2\alpha}{\rho g r}$$

Uzmemo li da je za vodu $\alpha = 0{,}075\ \mathrm{Nm^{-1}}$, a gustoća $\rho = 1000\ \mathrm{kg/m^3}$ možemo predvidjeti koliko će vode ostati u posudi .

9. Zaključak

Pokus s prevrnutom čašom vrlo je jednostavan i objašnjenje ne zahtijeva kompliciranu teoriju, samo definiciju tlaka i Boyle – Mariotteov zakon.
Kroz pokuse se upečatljivo demonstrira snaga tlaka zraka. Već mala povećanja volumena dovode do sila koje bez problema mogu nositi visoke stupce vode. Pokusi trebaju pokazati da se u fizici neka tvrdnja (ovdje tvrdimo da tlak zraka drži ploču) mora dokazati i kvantitativnim mjerenjima.
Sažeto možemo dakle pokus s okrenutom čašom vode opisati ovako: glavni razlog što voda ostaje u okrenutoj čaši je vanjski tlak zraka. To se lako dokazuje ako čašu s priljubljenom pločicom objesimo u vakuumsko zvono i počnemo isisavati zrak, već je i usisavanje ustima dovoljno da pločica otpadne i voda iscuri iz čaše. ***Sl. 13.***

I u slučaju kada u čaši postoji zrak, možemo tlak tog zraka ispuštanjem malih količina vode tako smanjiti da voda ostaje u čaši. Kako voda, kao i svaka druga tekućina, nema čvrstu površinu, površina se mora stabilizirati, što u našem slučaju omogućavaju razglednica, ploča od pleksiglasa ili mreža. Kako se lako možemo uvjeriti, adhezija između vode, stakla i ploče ovdje igra manju ulogu: vlažna ploča sama neće visjeti na čaši.

10. Literatura

[1] Elementary Textbook On Physics, G.S. Landdsberg, Mir Publishers, 304-319 (1985)
[2] Andreas Heithausen, Konrad Arnolds; PhyDid 2/5.117-122 (2006)
[3] P. R. Camp, Am. Journal of Physics 44, 604-605 (1976