

PRESNETI ČAJ

JANEZ STRNAD

Fakulteta za matematiko in fiziko

Univerza v Ljubljani

PACS: 47.55.Ca, 47.55.dr

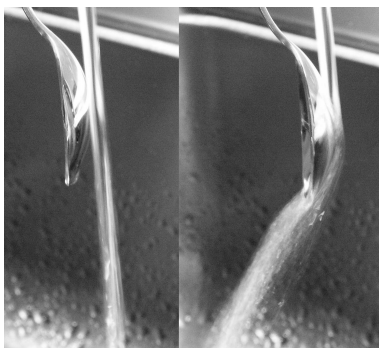
Marsikdo godrnja, ko pri nalivanju čaja iz čajnika zgreši skodelico. Podrobnejša opazovanja pojava pripeljejo do zanimivih spoznanj o toku tekočine.

THE TEAPOT EFFECT

It is annoying when pouring tea from a teapot the liquid misses the cup. Detailed observations of the phenomenon lead to interesting insight concerning the flow of fluids.

Opis pojava

Pogosto pri natakanju počasen curek čaja spolzi ob nosu čajnika in zgreši skodelico. Huje bi bilo, če bi se to pripetilo pri pretakanju kisline. Zato priporočajo, da med steklenico in posodo, v katero natakamo, postavimo stekleno palčko. Nezaželena vlaga se nabira na dnu okna, polzi po okviru navzdol in kvarí les. Tok vode po spodnjem delu okvira v notranjost preprečimo z navpično zarezo na spodnji strani okvira. Plamen ob požaru lahko po oviri doseže mesto, na katerem povzroči še več škode. Pri opisanih pojavih tok tekočine, na primer vode ali zraka, sledi oviri, če ni preveč ukrivljena (slika 1).



Slika 1. Curek vode steče ob žlici. (Foto: Aleš Mohorič)

Vloga ovire lahko prevzame tudi drug tekočinski tok. Pojav je že dolgo znan. O njem je leta 1800 poročal Thomas Young: „Tlak, ki sili plamen sveče k zračnemu toku iz meha, je verjetno natančno podoben tlaku, ki povzroči, da se zračni tok ob oviri ukrivi. Zaznamujte jamico, ki jo na vodni gladini povzroči tanek zračni curek. Z izbočenim telesom se s strani približajte curku in jamica bo takoj pokazala, da se je curek odklonil proti telesu.“ [1] Pogosto pojav imenujejo po čajniku teapot effect.

Pojav je pri večji hitrosti zraka od leta 1910 raziskoval Henri-Marie Coandă.¹ Zato govorijo o *Coandovem pojavu*. Nekateri povežejo pojav v počasnem toku s čajem, pojav v hitrem toku pa s Coando.

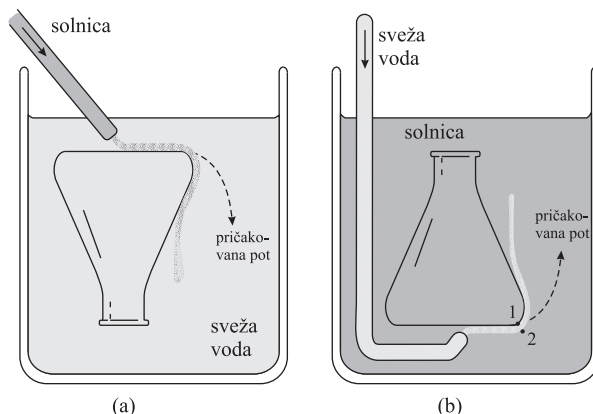
Okvirno pojasnimo pojav. Mislimo na tokovno cev v stacionarnem toku in Newtonov zakon $dF = dm a$ za del tekočine predelajmo v $-Sdp = Spds \cdot a$ in $dp = -\rho a ds$. Pri tem je a pospešek, $dm = Spds$ masa dela tekočine v tokovni cevi z dolžino ds in presekom S ter dp razlika tlakov. Minus opozarja, da sila deluje od večjega tlaka k manjšemu. Za tangentni pospešek vstavimo $a = dv/dt$ in upoštevamo hitrost $v = ds/dt$. Enačba $dp = -\rho v dv$ pove, da v tangentni smeri hitrost narašča s pojemajočim tlakom. Sklep poznamo iz Bernoullijeve enačbe.

Manj znano enačbo dobimo za ukrivljeno tokovno cev v radialni smeri. Za radialni pospešek vstavimo $a = -v^2/r$ z razdaljo od krivinskega središča tokovnic r . Minus opozarja, da pospešek kaže proti krivinskemu središču. Enačba $dp = \rho dr \cdot v^2/r$ pove, da tlak v ukrivljeni tokovni cevi narašča prečno na tokovnice v smeri od krivinskega središča. Zadnjo enačbo uporabimo za curek tekočine v laminarnem toku ob oviri. Na kraju, na katerem bi se ločil od ovire, curek nekaj mirujoče okolne tekočine potegne za seboj in tokovnice se ukrivijo. V točki bliže oviri (točka 1 na sliki 2b) je zato tlak manjši kot v točki dalj od ovire (točka 2 na sliki). Razlika tlakov potegne curek proti oviri. Lahko bi rekli, da ob ločitvi curka od ovire nastanejo vrtinci, ki silijo curek proti oviri. Kako daleč curek sledi oviri, je odvisno od hitrosti in lastnosti tekočine ter od ukrivljenosti ovire.

Markus Reiner je skrbno obdelal pojav, ne da bi poznal Coandovo delo [2]. V čisto vodo so postavili steklenico z ravnim dnem in trikotniškim presekom. Najprej je bila obrnjena z vratom navzdol. Na vodoravno dno so

¹Henri-Marie Coandă (1886–1972) je bil romunski častnik, letalec in aerodinamik, ki je deloval tudi v Franciji in Angliji. Pojav je opazil ob ponesrečenem poizkusu z reakcijskim letalom. Po njem se imenuje mednarodno letališče v Bukarešti.

s cevko poševno usmerili curek goste solne raztopine. Tok so zaznamovali z zrncom živilskega barvila. Curek goste raztopine je polzel ob stranski steni, preden se je obrnil navpično navzdol (slika 2a).



Slika 2. Curek slane vode v čisti vodi (a) in curek čiste vode v slani vodi (b). V curku vode se tokovnice ukrivijo, tako da je tlak v bližnji točki 1 manjši kot v bolj oddaljeni točki 2, in razlika tlakov potisne curek proti oviri [2, 5].

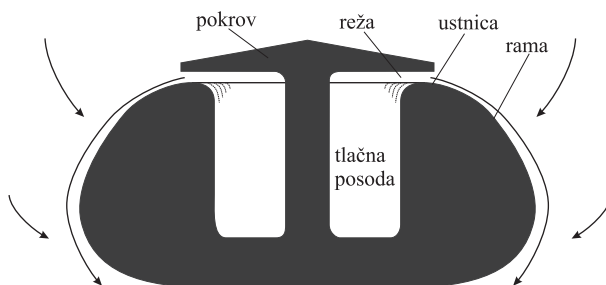
Nato so v nasičeno raztopino soli postavili steklenico z vratom navzgor in na vodoravno dno s cevko dovajali curek čiste vode. Zdaj je curek polzel ob vodoravnem dnu in nato ob stranski steni, preden se je obrnil navpično navzgor (slika 2b). Pri prvem poskusu je steklo privlačilo curek goste raztopine, pri drugem pa curek čiste vode. Po tem so sklepali, da pri pojavu nista pomembna površinska napetost ali adhezija, to je sila trdnega telesa na tekočino. Na izid poskusa ni vplivalo, če so nos čajnika prevlekli s tanko plastjo voska ali parafina, ki ga voda ne omoči. Namesto stekla so uporabili druge snovi in spreminjali okoliščine. Vselej je tekočina vsaj na kratki razdalji sledila oviri.

Pojav je leta 1957 z matematične strani obdelal Joseph Keller [3]. V dveh razsežnostih so rešili enačbe za gibanje nevaskozne nestisljive tekočine. Pri tem so nos čajnika opisali z vzporednima poltrakoma. Dobili so štiri rešitve. Dve so poznali. Pri prvi je tekočina tvorila omejen curek s konstantno hitrostjo po preseku med poltrakoma in njunima podaljškoma, pri drugi pa neomejen tok po vsej ravnini. Preostalih dveh rešitev še niso poznali. Pri prvi se je tok obrnil in se vračal po zunanji strani zgornjega poltraka, pri drugi pa po zunanji strani spodnjega poltraka. Če so vključili težo, je rešitev, pri kateri se je tekočina vračala ob zgornjem poltraku, postala

nestabilna. Rešitev, pri kateri se je tekočina vračala ob spodnjem poltraku, pa je ostala stabilna. Ta rešitev je ustrezala pojavu, značilnemu za čajnik. Viskoznost in površinska napetost nista vplivali na naravo rešitev.

Uporaba

Pojav so poskušali izkoristiti. Coandă je poganjal zrak skozi ozko režo ter za ploskev z osno simetrijo dosegel, da je curek sledil površju telesa in spremenil smer za 180° . Pri tem je curek iz okolice posrkal dvajsetkratni masni tok okolnega zraka. Tlak ob površju telesa je bil na vrhnji strani telesa manjši od zračnega tlaka. Zmanjšani tlak je dodatno pospeševal curek, ki je izhajal iz reže in povzročal dinamični vzgon. Običajno dinamični vzgon nastane zaradi gibanja krila po zraku. Opisani vzgon pa nastane zaradi curka zraka, ne da bi se telo gibalo (slika 3).



Slika 3. H. Coandă in I. Reba sta delala poskuse z osno simetričnim telesom. Iz šobe je izhajal curek zraka in zajel veliko okolnega zraka. Zmanjšani tlak ob vrhnji ploskvi je povzročil dinamični vzgon [4].

Coandă je izdelal model vozila na zračno blazino. Za vzgon je poskrbel zmanjšani tlak na vrhnji ploskvi, medtem ko pri običajnih vozilih te vrste za vzgon poskrbi povečan tlak na spodnji ploskvi. Nenavadni predlog je naletel na nasprotovanje, še posebej, ker je imel model obliko letече krožnika. Poskusi bi zatonili v pozabo, če v zasedenem Parizu med drugo svetovno vojno Nemci Coande ne bi vpregli v raketna raziskovanja. To je po vojni pritegnilo pozornost zaveznikov, ki so se namenili zadevo preiskati. Poskuse je najprej povzel eden od vodilnih aerodinamikov Theodore von Kármán leta 1949, pozneje pa se jih je lotil tudi Imants Reba na Brooklynskem tehnološkem inštitutu in v njegovem Laboratoriju za raketni pogon [4].

Reba je leta 1961 nadaljeval poskuse z vozilom na zračni blazini na razi-

skovalnem inštitutu, povezanem z vojsko. Model vozila s premerom 60 cm je imel stožčasto vrhnjo ploskev. Skozi režo v obliki ozkega obroča s premerom 15 cm je izhajal curek zraka z zvočno hitrostjo. Curek je ob površju vozila zajel zrak iz okolice, presegel zvočno hitrost in se zvrtinčil. Raziskali so več kot trideset različnih oblik telesa in z migoticami opazovali tok. Ugotovili so, da vzgon poveča stopnička tik pod šobo v obliki reže. Pomembni so bili še premer in širina reže, hitrost toka ter višina stopnice. Vendar niso mogli doseči zelenega vzgona. Leta 1963 je Coandă ob obisku predložil vodoravno pregrado in rep. Potem se je vozilo celo za več centimetrov dvignilo od tal. Delali so tudi poskuse s čolnom na zračni blazini. Vrtinčenje so izkoristili pri gorilniku za popolno zgorevanje plina. Na ta način so želeli narediti gorilnik za sežiganje težkih olj.

Izdelali so dva prototipa letal VZ-9 Avrocar, ki sta se dvignila in spustila navpično. Nato so poskuse opustili. Pojav pa so uspešno uporabili pri vrsti letal, med njimi pri ameriških Boeingu YC-14 in C-17 Globemasterju III ter posebej pri ruskem Antonovu An-72 [1]. S curki zraka, ki jih pihajo ob zgornjih ploskvah kril, povečajo vzgon, kar je zaželeno pri majhni hitrosti letala ob vzletu in pristanku. Pojav izkoriščajo tudi pri odstranjevanju smeti in rib iz vode v dovodih k turbinam ter za brisalce brez metlic na šipah avtomobilov. Pojav so obdelali v obliki, v kateri ga je mogoče opisati pri pouku v srednjih šolah [6].

Model za hitri tok

Francoska raziskovalna skupina je izvedla podrobne poskuse s poenostavljenim modelom v različnih okoliščinah [7]. Na vodoravno krožno ploščico s polmerom $r = 15$ mm so navpično navzdol usmerili curek vode s polmerom $r_0 = 4$ mm in hitrostjo v_0 od 1 do 5 m/s. Na ploščici se je curek nadaljeval kot tanka plast z debelino h . Voda je tekla radialno navzven in se na robu ploščice odklonila poševno navzdol. Merili so odklon α proti navpičnici, v odvisnosti od hitrosti v_0 .

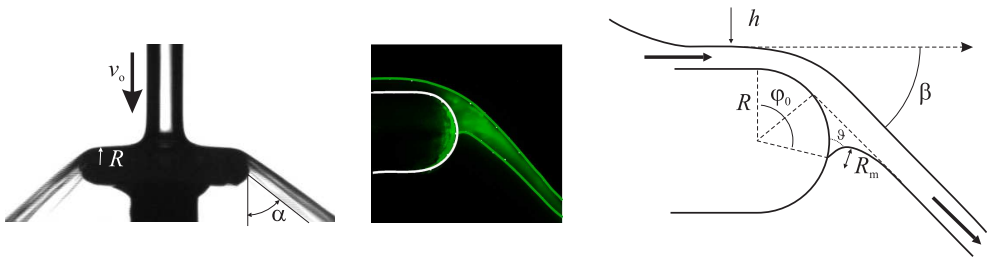
Pri prvem nizu poskusov so merili s ploščicami, katerih površje so na različne načine obdelali, da se je spremenil mejni kot ϑ . Pri drugem nizu poskusov so merili s ploščicami z različnimi debelinami $2R$ s krivinskim polmerom R na robu osnega preseka. V tretjem nizu so merili z vodo ter z mešanico glicerina in vode z dvakrat večjo viskoznostjo. Pokazalo se je, da to ni vplivalo na izide. Tok je bil precej hiter. Reynoldsovo število v

navpičnem curku $Re = 2r_0\rho v/\eta$ je merilo od 4000 do 20000, v plasti pa je bilo $Re = h\rho v/\eta$ desetkrat manjše. Teže ni bilo treba upoštevati. Izidi pa so bili odvisni od mejnega kota in od površinske napetosti. S superhidrofobno snovjo z mejnim kotom blizu 180° na ploščici so preprečili pojav (slika 4).



Slika 4. S superhidrofobno snovjo so premazali nos čajnika (levo) in s tem preprečili pojav (desno) [7].

Približno so ugotovili, kako je odklon odvisen od mejnega kota in debeline ploščice. Privzeli so, da je masni tok v navpičnem curku $\phi_{m0} = \rho v_0 \pi r_0^2$ enak radialnemu masnemu toku v plasti $\phi = \rho v \cdot 2\pi r h$ in da se ohrani tudi tok gibalne količine $v_0 \phi_{m0} = v \phi_m$. Iz tega sta sledili zvezi $v = v_0$ in $h = \frac{1}{2} r_0^2 / r$. Na robu ploščice pri razdalji r od osi se je curek odlepil in se od vodoravnice odklonil za kot $\beta = \frac{1}{2}\pi - \alpha$ (slika 5).

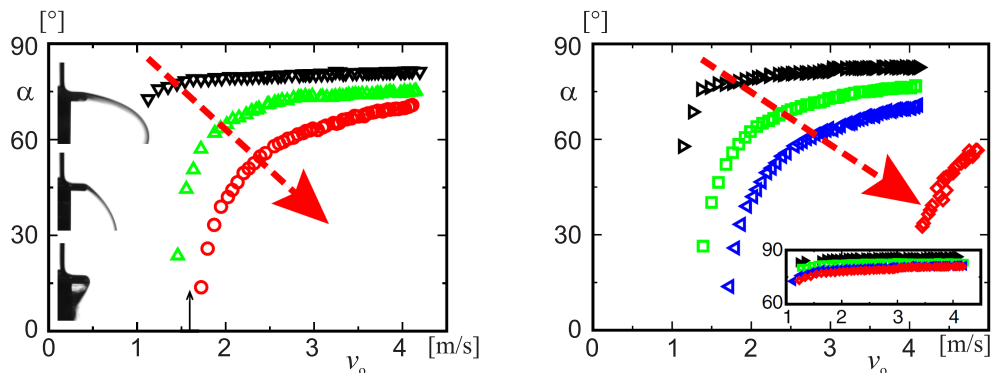


Slika 5. Slika poskusne naprave (levo) in slika plasti, ko se odlepi od ploščice (desno). Po [7].

Po več približnih korakih so dobili zvezo:

$$\beta \propto \sqrt{1 + \cos \vartheta} / v_0 .$$

Merjenja so pokazala, da kot $\alpha = \frac{1}{2}\pi - \beta$ zares narašča z naraščajočo hitrostjo in z naraščajočim mejnim kotom (slika 6).



Slika 6. Odvisnost kota α od hitrosti v_0 za tri vrednosti mejnega kota ϑ (levo, puščica kaže od mejnega kota 175° preko 115° do 10°) in tri vrednosti krivinskega polmera R (desno, puščica kaže od polmera $0,03$ mm preko $0,5$ mm do $1,2$ mm). V računih se pojavita kot φ , ki določa omočeno področje, in krivinski polmer meniska R_m . Po [7]. Zahvaljujem se profesorju Lydericu Bocquetu z univerze Lyon 1, ki je ljubeznivo dovolil objavo te in prejšnje slike.

Opisana raziskovanja so pritegnila precej pozornosti.

LITERATURA

- [1] Coanda effect, http://en.wikipedia.org/wiki/Coand%83_effect.
- [2] M. Reiner, *The teapot effect ... a problem*, Phys. Today **9** (1956) 16–20 (9); *Teapot means Coanda*, ibid. **20** (1967) 5, 15.
- [3] J. B. Keller, *Teapot effect*, J. Appl. Phys. **28** (1957) 859–864.
- [4] I. Reba, *Applications of the Coanda effect*, Scientific American **214** (1966) 6, 84–91.
- [5] J. Walker, *The troublesome teapot effect, or why a poured liquid clings to the container*, Scientific American **251**, (1984) 4, 140–144.
- [6] T. López-Arias, L. M. Gratton, S. Bon in S. Oss, „Back of the spoon“ outlook of Coanda effect, Phys. Teacher, **47** (2009) 508–512.
- [7] C. Duez, C. Ybert, C. Clanet in L. Bocquet, *Wetting controls separation of inertial flows from solid surfaces*, Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 084503 1–4.