

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 22 (1994/1995)

Številka 3

Strani 146-152

Janez Strnad:

ŽEJNA RAČKA

Ključne besede: fizika, toplota, toplotni stroji, izkoristek, krožna sprememba.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/22/1220-Strnad.pdf>

© 1994 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.

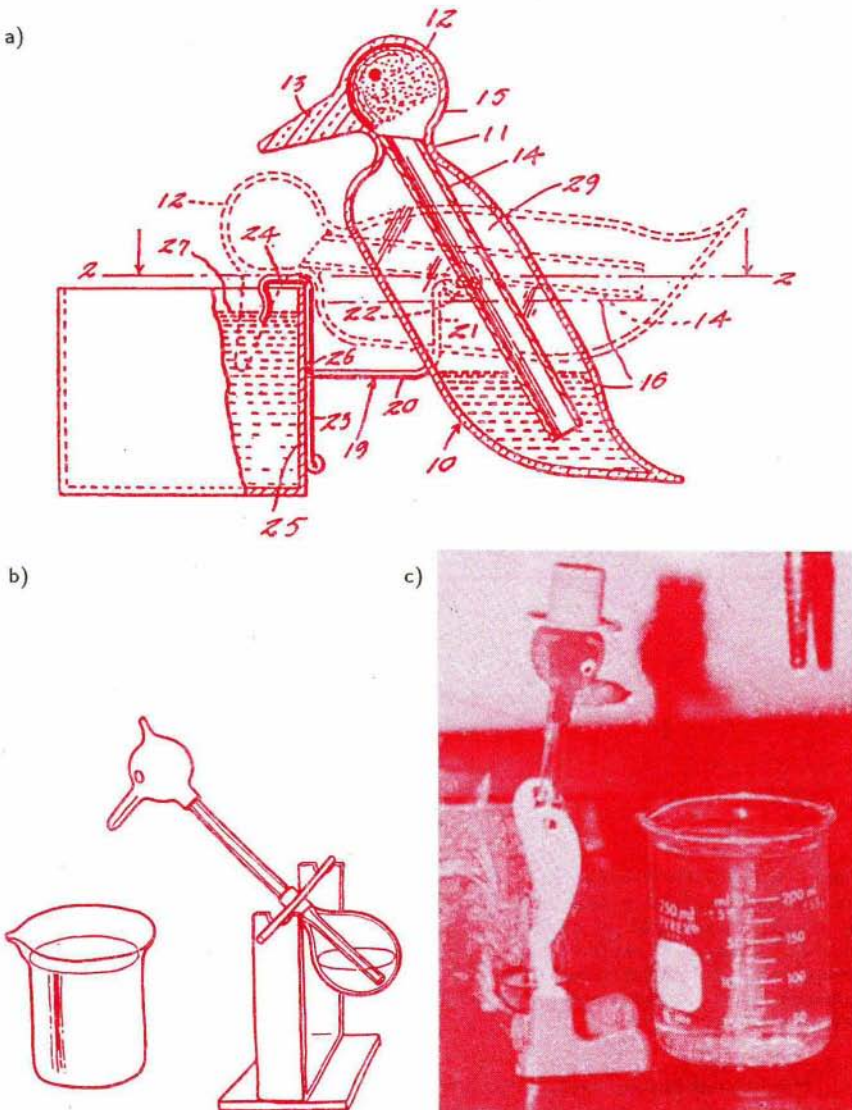
ŽEJNA RAČKA

Prispevki iz toplote so na splošno zahtevnejši kot prispevki iz mehanike. V mehaniki lahko pogosto neposredno opazujemo gibajoče se telo in gibanje majhnega telesa opišemo tako, da povemo, kako se s časom spreminjajo njegove koordinate. V toploti so razmere bolj nepregledne in jih pogosto ne moremo tako neposredno opazovati. Poleg tega so v njej količine odvisne od več spremenljivk. Tako je na primer tlak v posodi s plinom odvisen od prostornine in od temperature. Na drugi strani je toplota ali termodinamika zelo splošna veja fizike. Albert Einstein je v *Avtobiografskem* o njej zapisal: "Teorija naredi tem močnejši vtis, čim preprostejše so njene osnovne trditve, čim bolj raznovrstne stvari povezuje in čim širše je območje njene uporabe. Od tod globok vtis, ki ga je name naredila termodinamika. To je edina fizikalna teorija s splošno vsebino, o kateri sem prepričan, da je v okviru, v katerem lahko uporabimo njene osnovne pojme, nikoli ne bodo ovrgli."

V času zadreg z energijo je posebno pomembno poglavje o toplotnih strojih. Presek je pred časom v nanizanki opisal nekatere velike toplotne stroje, na primer parno turbino. Zdaj pa se bo lotil mnogo manjšega toplotnega stroja, *žejne račke*. Te igračke ne moremo izkoristiti za pridobivanje moči, lahko pa jo izkoristimo za razmišljanje o toplotnih strojih. Bralci Preseka jo prav gotovo poznajo, saj jo omenja učbenik fizike za sedmi razred.

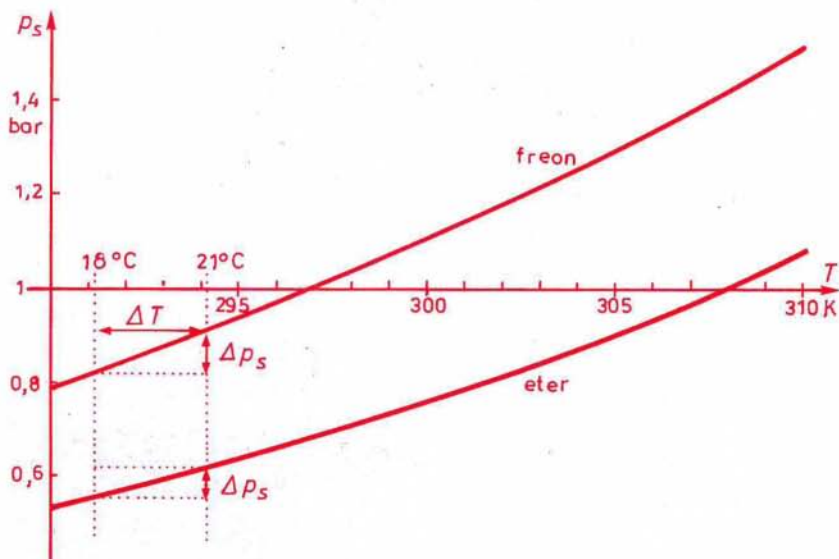
Drobni napravi v obliki ptiča pomočimo prvič kljun v vodo, nato pa sama sebi prepuščena ponavlja to gibanje. Kaže, da si je račko prvi zamislil M.V.Sullivan, ki jo je v ZDA patentiral leta 1946 (slika 1). Račka ne more biti *perpetuum mobile*, saj vemo, da ideje takega stroja ni mogoče uresničiti. Ni mogoč ne *perpetuum mobile prve vrste*, ki bi oddajal delo, pa mu ne bi dovajali ne toplote ne dela, ne *perpetuum mobile druge vrste*, ki bi mu dovajali samo toploto in bi oddajal samo delo pri vseskozi enaki temperaturi. Mogoče pa je zgraditi toplotni stroj, ki mu dovajamo toploto pri višji temperaturi in od njega odvajamo delo in toploto pri nižji temperaturi. Preden poskusimo pojasniti delovanje račke, si oglejmo, kako je sestavljena.

Račko sestavljata dve posodici: trup in glava. Povezuje ju cev, ki sega skoraj do dna trupa. V trupu je obarvana kapljevína, ki ima pri navadnem tlaku vrelišče pri sobni temperaturi oziroma ne znatno više. Vrelišče je odvisno od tlaka; čim večji je tlak, tem više je vrelišče. Trditev lahko obrnemo: izparilni tlak je odvisen od temperature; čim večji je izparilni tlak, tem više je



Slika 1. Risba žejne račke na patentni prijavi M.V.Sullivanov iz leta 1946 (a), risba iz knjige J.Ferbar, F.Plevnik, Fizika za sedmi razred, DZS, Ljubljana 1974, str.106 (b) in fotografija iz članka R.Mentzer, *The drinking bird - the little heat engine that could*, *The Physics Teacher* **31** (1993) 126 (c). Nekaj podatkov je mogoče dobiti tudi v članku L.M.Ng, Y.S.Ng, *The thermodynamics of the drinking bird toy*, *Physics Education* **28** (1993) 320.

temperatura. Ugodno je, če se izparilni tlak izrazito spreminja s temperaturo (slika 2). Obema zahtevama najbolje ustreza klorofluroogljikovodik freon 11 (CCl_3F) z vreliščem pri $23,8^\circ\text{C}$. Je brez vonja in okusa in je zelo obstojen. Na veliko so ga uporabljali v hladilnikih, vendar so uporabo opustili. Ko uide v ozračje, namreč v visokih plasteh uničuje plast ozona, ki nas ščiti pred ultravijolično svetlobo s Sonca. Nadomestila ga bo najbrž spojina CF_3CHCl_2 z vreliščem pri 28°C . (Nekdaj so v ta namen uporabljali eter z vreliščem pri $34,6^\circ\text{C}$.)



Slika 2. Izparilni tlak freona in etra v odvisnosti od temperature okoli sobne temperature. Na vodoravno os je nanesena temperatura T v kelvinih in na navpično os izparilni tlak p_s v barih. Izparilni tlak pri vrelišču je enak 1 bar. Nagib krivulj v vrelišču izračunamo s Clausius-Clapeyronovo enačbo $\Delta p_s / \Delta T = (Mq_i / R)p_s / T$. Mq_i je kilomolska izparilna toplota in R splošna plinska konstanta. Razliki temperatur 3 K ustreza pri freonu razlika izparilnih tlakov 120 milibara in pri etru razlika 100 milibara. Obratni diagram bi pokazal odvisnost vrelišča od tlaka.

Preden napolnimo račko s kapljevino, iz nje izsesamo zrak. Blizu sredine cevi je nameščena vodoravna os. Težišče račke je pod osjo, ko je kapljevina v trupu. Račka je v stabilni ravnovesni legi, nagnjena nekoliko naprej. Ko se dviga kapljevina v cevi, se dviga težišče in se naposled dvigne nad os. Lega postane labilna in račka se skloni naprej. Ob tem kapljevina izprazni cev in se skozi njo prelije nazaj v trup. Račka se vzravna in igra se ponovi.

Kljun, ki ga račka pomoči v vodo, je izdelan iz luknjičave snovi in v njem se nabere nekaj vode. Voda iz kljuna izhlapeva in jemlje iz okolice izparilno toploto. Zato ima glava račke malo nižjo temperaturo kot trup, ki ima temperaturo okolice. Razlika temperatur je odvisna od tega, kako vlažen je zrak ob glavi račke. (Poznamo napravo, ki ji pravimo *psihrometer* in ki sta jo svoj čas obravnavala tako znana fizika kot James Clerk Maxwell in Jožef Stefan. Naprava sestoji iz dveh termometrov; eden je *suh*, drugi, katerega posodico ovija mokra krpica, pa *moker*. Mokri termometer zaradi izhlapevanja vode kaže manj kot suhi. Na termometra pihamo zrak s pihalom, ki ne spremeni njegove temperature. Temperaturna razlika je največja pri relativni vlažnosti 0 in je enaka nič pri relativni vlažnosti 100 %, ko je zrak nasičeno vlažen in ne more sprejeti nič več vode. Po izmerjeni razliki temperatur iz psihometrične preglednice določimo relativno vlažnost.)

Pri žejni rački navadno ne uporabimo pihala, zato je temperaturna razlika malo manjša, kakor jo preberemo pri dani temperaturi zraka iz psihometrične preglednice. Pri temperaturi zraka 21°C doseže kljun račke okoli 18°C. Temperatura v glavi račke je sicer nekoliko višja kot v kljunu, a vseeno za stopinjo ali dve nižja kot temperatura v trupu. Zato je izparilni tlak v trupu višji kot v glavi. V trupu kapljevine izpareva, medtem ko se v glavi para utekočinja. Nad gladino kapljevine se v trupu pri višjem izparilnem tlaku večja masa pare in izpodriva kapljevine v cev. V glavi se pri nižjem izparilnem tlaku para utekočinja in polzi navzdol v cev. Gladina kapljevine v cevi se dviga, z njo tudi težišče in naposled se račka nagne naprej. Kapljevine se vrne v trup. Medtem kljun znova zajame malo vode in igra se ponovi in se ponavlja, dokler račka ne porabi vode v kozarcu.

Z žejno račko je mogoče narediti zanimive poskuse. Če pihamo nanjo zrak s pihalom, ki zraku ne spremeni temperature, postane časovni razmik med dvema priklonoma račke krajši. Kot smo omenili, se zaradi zračnega toka zniža temperatura mokrega termometra, torej kljuna račke. Zaradi večje temperaturne razlike se poveča razlika izparilnih tlakov in se kapljevinski stolpec v cevi dviga hitreje. Navadno račka dela, če glavo preko kljuna hladimo z izhlapevanjem vode. Enak učinek dosežemo tako, da trup segrevamo. Pobarvamo ga črno, postavimo račko na sonce in ji glavo pokrijemo z belim klobukom. Priklona račke si sledita v še krajšem časovnem razmiku. Trup se zaradi absorbirane sončne svetlobe segreje za nekaj stopinj nad temperaturo okolice, medtem ko ima glava domala temperaturo okolice. Poskusi z različnimi račkami ne dajo povsem enakih rezultatov.

Opisani poskus z račko, ki deluje, čeprav ne pije - torej ni "žejna", je posebno poučen, ker pokaže, da je za toplotni stroj pomembna temperaturna razlika. Račka deluje kot toplotni stroj, če ima trup temperaturo okolice in glava, zaradi hlajenja z izhlapevanjem vode, nižjo temperaturo. Deluje pa tudi, če ima glava temperaturo okolice in trup, zaradi segrevanja s sončno svetlobo, višjo temperaturo. Robert Pohl, za katerega je mogoče reči, da je prvi gradil predavanje iz uvodnega tečaja fizike izrazito na demonstracijskih poskusih, je v svojem učbeniku opisal še bolj poučen poskus. Strojček na vroči zrak (v Preseku je opisal stroje na vroči zrak R. Jerman v 1. številki 4. letnika) je deloval kot toplotni stroj, če je bil njegov spodnji del v vrelem glicerinu pri temperaturi 220°C in njegov zgornji del v vodi s temperaturo 20°C . Deloval pa je tudi, če je bil njegov spodnji del potopljen v tekoči zrak pri temperaturi -180°C in njegov zgornji del pri temperaturi 20°C . Strojček se je v drugem primeru vrtel približno enako hitro kot v prvem. Izkoristek je namreč približno sorazmeren z razliko temperatur, ki je bila v obeh primerih enaka: $(220 - 20)^{\circ}\text{C} = 200^{\circ}\text{C}$ in $[20 - (-180)]^{\circ}\text{C} = 200^{\circ}\text{C}$.

Tak poskus s strojčkom na segreti zrak sem pokazal pred leti pri predavanju iz fizike v prvem letniku. Strojček je deloval, če je spodnji del lizal plamen ali če je bil spodnji del potopljen v tekoči zrak. Toda po poskusu strojček ni več deloval. Kot kaže, so bila tesnila slaba in so se pri temperaturi tekočega zraka pokvarila. Strojček so popravili, vendar ga odtlej ne poskušamo več potopiti v tekoči zrak, da se ne bi zopet pokvaril.

Poskuse je mogoče spremljati z računi. Če se zadovoljimo z ocenami, lahko zajamemo vse račke. Običajna račka pije vsako minuto enkrat ali dvakrat. To pomeni, da traja en mah okoli pol minute do minute. Med tem se dvigne v cevi s presekom 1 cm^2 gladina za nekaj centimetrov. Račka ne odda koristnega dela, opravi pa delo proti trenju in upor. Oddano delo ob enem mahu lahko ocenimo s tem, da pomnožimo težo kapljevine stolpca s potjo težišča. Težo dobimo tako, da maso pomnožimo s težnim pospeškom, maso tako, da gostoto kapljevine ($1,47 \cdot 10^3\text{ kg/m}^3$) pomnožimo s prostornino (preseki okoli 1 cm^2 krat višina stolpca okoli 2 cm). To pomnožimo s potjo težišča 1 cm in dobimo nekaj desetstisočin joula na en mah.

Kako učinkovita je račka kot toplotni stroj, ugotovimo z dovedeno toploto. Te ne poznamo, pač pa lahko ocenimo odvedeno toploto preko mase vode, ki izhlapi v kljunu, to je z maso vode, ki jo "spije" račka iz kozarca. Pri več sto mahih spije en do dva kubična centimetra vode, to je en do dva grama. Izparilna toplota vode meri $2,6$ milijonov joulov za kilogram. Za gram porabimo tisočkrat manj in za en mah še nekaj stokrat manj, torej vsega

nekaj joulov. Delo A , ki ga stroj odda, dobimo kot razliko dovedene Q_{dov} in odvedene toplote Q_{odv} : $A = Q_{dov} - Q_{odv}$. V našem primeru je delo tako majhno, da lahko dovedeno toploto približno izenačimo z odvedeno. Po tem ocenimo izkoristek račke z

$$\eta = \frac{A}{Q_{dov}} \approx 10^{-4}.$$

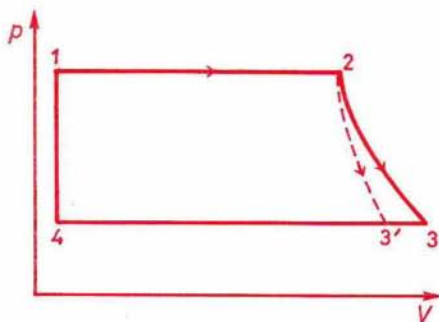
Na drugi strani izračunamo *izkoristek idealnega toplotnega stroja* z enačbo:

$$\eta_{id} = \frac{\Delta T}{T} \approx 10^{-2}.$$

Pri tem je T višja temperatura v toplotnem stroju in ΔT razlika višje in nižje temperature. Temperaturo moramo meriti v absolutni lestvici, to je od absolutne ničle -273°C v kelvinih. Razliko temperatur smo ocenili s 3 K in za sobno temperaturo postavili 300 K. Ocenjeni izkoristek račke je še kakih stokrat slabši od izkoristka idealnega toplotnega stroja, ki bi delal med istima temperaturama.

Stroj dela periodično, pravimo, da ponavlja *krožno spremembo*, ki jo lahko ponazorimo v diagramu pV . Pri tem zasledujemo v stroju izbrano maso delovne snovi. Oglejmo si diagram za parni stroj, ki ga imenujejo po Škotu Macquornu Rankineu. Voda v parnem kotlu izpareva pri visoki temperaturi in konstantnem večjem tlaku. Nastala para ima večjo prostornino (12). Para se v valju razpne, ko odriva bat, ne da bi oddala ali prejela toploto (23) in se ohladi. Para se pri nižji temperaturi v kondenzatorju pri konstantnem nižjem tlaku utekočini. Nastala voda ima manjšo prostornino (34). Nazadnje črpalka stisne vodo v kotel (41) in krožna sprememba se lahko ponovi (slika 3).

Slika 3. Diagram pV za parni stroj - Rankineova krožna sprememba. Zasledujemo določeno maso vode na poti skozi parni stroj. Na podoben način poskušamo zasledovati del kapljevine v žejni rački: masa tega dela in temperaturna razlika ter z njo povezana razlika izparilnih tlakov so veliko manjši kot pri parnem stroju. Poleg tega dobimo tako krožno spremembo ob izdatni idealizaciji. Več podatkov najde bralec v prispevku P.E.Richmond, *The thermodynamics of a "drinking" duck* v *Entropy in the School I* (ur. G.Marx), Roland Eötvös Physical Society, Budapest 1983, str. 215.



V žejni rački so razmere mnogo manj pregledne. Dogodki niso časovno tako dobro ločeni in deli delovne snovi se mešajo drug z drugim. Vseeno poskusimo krožno spremembo do skrajnosti idealizirati, da bi jo primerjali s krožno spremembo pri parnem stroju.

Kapljevina v trupu pri višji temperaturi in večjem tlaku sprejema toploto iz okolice in izpareva pri konstantnem tlaku, potem ko se je račka zravnila. Nastala para ima večjo prostornino (12). Ob tem potiska para preostalo kapljevino v cev, dokler se račka ne prevesi. Tedaj se nastala para kot topel mehur dvigne v glavo, kjer je temperatura nižja in je manjši tlak. Pri tem ne moremo reči, da para ni sprejela nič toplote, in se prostornina le malo spremeni (23'). (Ustrezna črta je bolj strma kot pri parnem stroju, slika 3.) V glavi pri konstantnem nižjem tlaku se para utekočinja in oddaja izparilno toploto preko glave. Del te toplote se porabi za izhlapevanje vode v kljuno. Nastala kapljevina ima manjšo prostornino (3'4). Ko se račka prevesi, stisne teža kapljevino v trup k višji temperaturi in večjemu tlaku (41).

Kotel parnega stroja ustreza trupu račke in kondenzor glavi. Delovna snov je majhen del kapljevine, ki izpari in se utekočini (pri tem ni treba, da bi se utekočinil isti del). Del kapljevine, ki ne izpari, in del pare, ki se ne utekočini, ne sodelujeta pri krožni spremembi. Batu v valju parnega stroja ustreza kapljevinski stolpec v cevi, vlogo črpalke pa opravi teža. Upoštevati velja, da je temperatura v notranjosti račkine glave nekaj višja od temperature vlažnega kljuna in temperatura trupa malo nižja od temperature okolice.

Od vseh ugotovitev, do katerih nam je pripomogla žejna račka, je najpomembnejša ta, da ne obstaja toplotni stroj, ki ne bi oddajal toplote pri nižji temperaturi. Zato stroj odda kot delo samo razliko med toploto, ko mu jo dovedemo pri višji temperaturi, in toploto, ki jo odvedemo od njega pri nižji temperaturi. Izkoristek toplotnih strojev je veliko manjši kot 1, medtem ko se izkoristek mehaničnih strojev, na primer vodne turbine, približa 1. S tem je povezanih nekaj bridkih resnic. Kot delo lahko v toplotnih strojih izkoristimo samo majhen del toplote, ki jo dobimo s sežigom goriv, redko kaj več kot dobro tretjino. Poleg tega s toploto, ki jo moramo pri nižji temperaturi odvajati, okolico toplotno onesnažujemo.

Janez Strnad