

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 26 (1998/1999)

Številka 1

Strani 2-7

Janez Strnad:

ČLOVEŠKA MOČ

Ključne besede: fizika, energija, izkoristek, moč, človeški stroj.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/26/1358-Strnad.pdf>

© 1998 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.

ČLOVEŠKA MOČ

Pojma *dela* in kinetične energije so v fiziki razčistili šele dobrih sto let po drugem Newtonovem zakonu, čeprav je izrek o kinetični energiji neposreden nasledek tega zakona. Vendar so že pred tem razpravljali o delu, ki so ga imenovali napor, moment aktivnosti in še kako drugače. Morda je bil eden od razlogov takratnega povečanega zanimanja za delo tisto delo, ki ga opravi človek med delavnikom. To je mogoče razumeti, ker so v tedanjem času v glavnem izkoriščali delo ljudi in živali. Delo so računali tako, da so silo pomnožili s potjo njenega prijemališča. Pri tem so vsaj za delo teže uporabljali enoto kilogrammeter, kot da bi ne šlo za težo, ampak za maso. Zanimala jih je še *moč*, to je delo na časovno enoto. Tudi to ime se je ustalilo pozneje. Moč so dobili, ko so silo pomnožili s hitrostjo njenega prijemališča.

V 17. stoletju je italijanski fiziolog Giovanni Borelli človeka obravnaval kot sestavo vzvodov in osi. Francoz Antoine Parent si je leta 1702 prizadeval z mehaničnimi enačbami pojasniti delovanje telesa. Že tedaj je privlačilo pozornost vprašanje, kolikšno delo naj bi človek opravil v delavniku, ki je tedaj navadno trajal 10 ur. Tisti, ki so resnično delali, niso računali in tistim, ki so računali, ni bilo treba opravljati te vrste dela. Slednji so posredovali številne podatke, ki so se med seboj znatno razlikovali, a jih – presentljivo – sploh niso poskusili poenotiti.

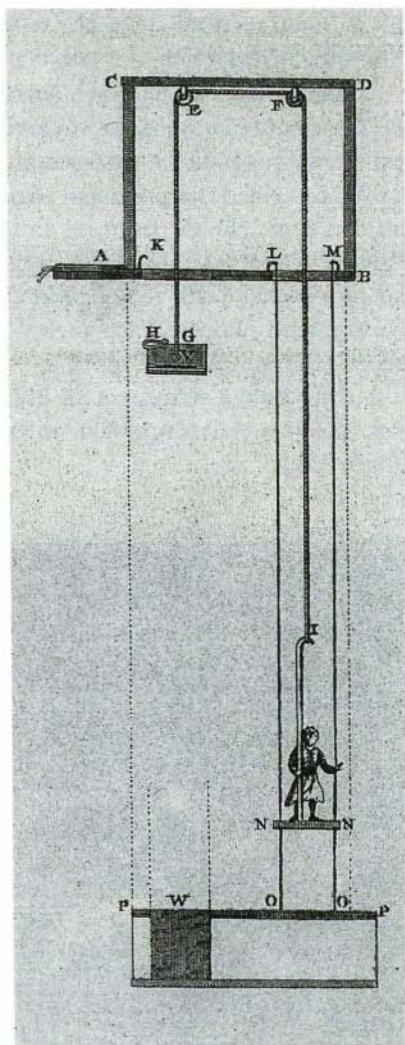
Philippe de La Hire je leta 1699 v poročilih francoske akademije znanosti trdil, da človek lahko deluje na drugo telo v vodoravni smeri s silo, ki ustreza teži 14-kilogramske uteži. V istem zvezku je Guillaume Amon-ton, znan po prispevku k plinskim zakonom, poročal, da je pri brusilcih stekla izmeril malo manjšo silo. Brusilec naj bi s silo, ki ustreza teži 12,5-kilogramske uteži, klado s smirkom potiskal po steklu s hitrostjo 0,49 m/s po deset ur na dan. Ob moči 60 W bi tako v osmih urah opravil delo 1,7 MJ ali 0,5 kWh. Tedaj so za razdaljo uporabljali enoti pariški čevelj (0,325 m) ali angleški čevelj (0,305 m) in za maso funt (0,5 kg). Zmešnjavi se izognemo, če vse podatke preračunamo v naše enote in se omejimo na osemurni delavnik. Pri tem upoštevamo, da je teža enega kilograma enaka 9,8 newtona. 1 MJ, megajoule, je milijon joulov, 1 kWh, kilowattura, pa 1000 W·3600 s, to je 3,6 MJ.

Charles Augustine de Coulomb, ki je izmeril silo med naelektrenima telesoma, je pred dvesto leti objavil obsežno raziskavo o delu človeka. Ugotovil je, da delo razmeroma dobro izkoristi naprava, pri kateri se delavec po stopnicah povzpne v košaro, se z njo spusti in pri tem dvigne breme, malo manjše od svoje teže, se znova povzpne in to ponavlja. Take naprave so pogosto uporabljali (slika 1). Pri eni od njih se je delavec v

15 minutah dvignil za 75 metrov in pri masi 70 kg dosegel moč 86 W. Coulomb najbrž ni poznal podatka Angleža Johna Theophila Desaguillera, ki je navedel za moč pri hoji navzgor skoraj dvakrat več, 156 W. Pač pa je zvedel od prijatelja, ki je vodil odpravo na otok Tenerife, da je njegovo moštvo doseglo višino 2923 metrov po hoji, ki je trajala 7 ur in $\frac{3}{4}$. Tako je dobil za moč rezultat 72 W in za osemurno delo 0,58 kWh. Po Badjurovem vodniku po slovenskih vrhovih naj bi se planinec v eni uri povzpел v povprečju za 400 m. Temu ustreza za 70-kilogramskega človeka moč 76 W. Pri osemurni hoji bi planinec opravil delo 0,61 kWh.

Prijatelj Jamesa Watta John Robison je navedel podatke za gugalnici podobno črpalko. Mladenič z maso 68 kg in dodatnim bremenom 15 kg je tekal z ene strani vzvoda na drugo in poganjal črpalko z močjo 151 W. V osmih urah je opravil delo 1,2 kWh. Angleški kaznjenci so poganjali mlin tako, da so v votlem valju hodili na mestu. V šestih urah so se tako dvignili in spustili učinkovito za 2630 m. Pri tem bi z močjo 83 W v osmih urah opravili delo 0,66 kWh.

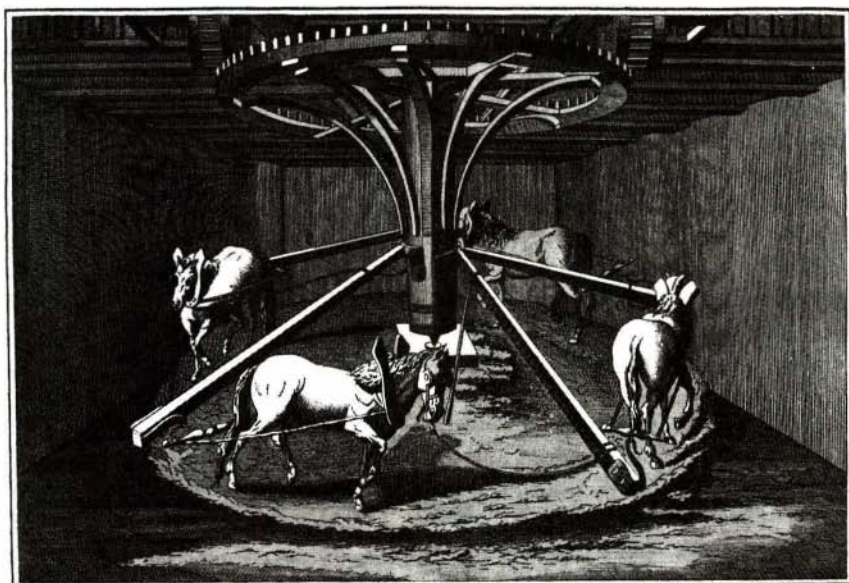
Povprečje starih podatkov za moč človeka od 60 W do 156 W je 100 W, kar bi lahko imenovali *človeška moč*. V osemurnem delavniku bi s to močjo opravili delo 0,8 kWh. Danes večino dela opravijo stroji. Po višji zimski tarifi za električno delo (16 tolarjev/kWh) bi to stalo nekaj manj kot 13 tolarjev, po nižji tarifi



Slika 1. Stara naprava, pri kateri se je delavec vzpel po stopnicah na ploščad v višini L, se z njo spustil in dvignil pri tem posodo z vodo z malo manjšo težo od svoje. V višini K se je posoda spraznila in plošča se je spustila sama, ko se je delavec vzpenjal po stopnicah, ki niso narisane.

pa še manj. Zaradi tega sta dandanes človeško delo in človeška moč v uporabljenem pomenu besede nepomembna.

Zanimivo je zasledovati, kako so primerjali človeka s konjem. Že pri La Hiru najdemo podatek, da konj zmore sedemkrat toliko kot človek, in pri Amontonsu, da zmore šestkrat toliko. Drugi so razmerje postavili med 2,5 in 14. Nekdo je predlagal razmerje 5,87, a je upošteval, da konj dela na dan 8 ur, človek pa 10 ur, in tako prišel do efektivnega razmerja 4,6. Angleži so večinoma navajali večje razmerje; brez dlake na jeziku je eden od njih pojasnil, da za enega konja zaleže 5 Angležev, a 7 Francozov ali Nizozemcev. James Watt je za merjenje moči parnih strojev vpeljal kot enoto *konjsko moč*, za katero je veljal dogovor, da ustreza 735 W, dokler je mednarodni sistem enot ni ukinitil (slika 2). Noben konj ne more dalj časa delati s tolikšno močjo, zato so Wattovo enoto nehali povezovati z močjo konj.



Slika 2. Stara naprava, ki je izkoriščala potisno silo konj. Po podatkih iz druge roke za tako napravo je J. Watt določil konjsko moč.

V štiridesetih letih prejšnjega stoletja sta nemška zdravnik ob misli na človeka kot stroj razvila *energijski zakon*. Robert Mayer je leta 1842 slutil, da se energija ohrani, čeprav je to povedal z drugimi besedami. Hermann von Helmholtz je najprej raziskoval kemijske reakcije, ki potekajo v človeškem telesu, in prišel do sklepa, da se v bistvu ne razlikujejo od reakcij v neživi naravi. Leta 1847 je podrobno obdelal potencialno energijo in jo postavil v zvezo s kinetično energijo. Tri leta pozneje je Rudolf Clausius zapisal *energijski zakon*, kot ga uporabljamo v termodinamiki

$$\Delta W_n = Q + A.$$

Sprememba notranje energije je enaka delu in toploti.

Energijski zakon je spremenil pogled na človeško delo. Helmholtz je zapisal: "Večina fiziologov v prejšnjem stoletju in na začetku tega [19. stoletja] je menila, da pojave v živih telesih določa glavni dejavnik, ki so ga imenovali "življenjska sila". [...] Nasprotno pa sedanji rod trdo dela, da bi našel prave vzroke pojavov, ki potekajo v živem telesu. Ne mislijo, da obstaja kaka druga razlika med kemijskimi in mehaničnimi pojavi v živem telesu in zunaj njega, kot tista, ki jo je mogoče pojasniti z bolj zapletenimi okoliščinami. Videli smo, da *energijski zakon* podpira to misel. Zakon kaže pot, po kateri to temeljno vprašanje lahko rešimo s poskusom." To se je zares zgodilo.

Upoštevajmo zapisani *energijski zakon* za časovno enoto v stacionarnih okoliščinah:

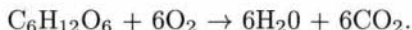
$$P_k = P_Q + P.$$

Telo, v katerem se "*notranja energija*"¹ pri kemijskih reakcijah v časovni enoti manjša, oddaja toplotni tok in mehanično moč. Vse tri količine P_k , P_q in P so potemtakem negativne.

Oddano mehanično moč P merimo z ergometrom, na primer z izpopolnjeno različico sobnega kolesa z merilniki za hitrost, srčni utrip, moč. P_k določimo preko porabe kisika iz zraka, ki ga dihamo. Oddanega toplotnega toka ni treba meriti, ampak ga izračunamo kot razliko $P_q = P_k - P$.

¹ To ni res. Delo bi morali razdeliti na delo tlaka in preostalo delo A ter ugotoviti, da se pri konstantnem tlaku vsota spremembe notranje energije in negativnega dela tlaka ujema s spremembo *entalpije*. P_k je potemtakem zmanjšanje entalpije na časovno enoto. Ker besede *entalpija* srednješolci ne poznajo, jo nadomestimo z "*notranjo energijo*". Če se ne spremeni prostornina in je delo tlaka enako nič, postanejo narekovaji odveč.

Porabo kisika raziščimo pri oksidaciji glukoze enega izmed ogljikovih hidratov:



En mol glukoze z maso 180 g porabi 6 molov kisika s prostornino 136 dm^3 pri temperaturi $0 \text{ }^\circ\text{C}$ in navadnem zračnem tlaku ter sprosti 2,87 MJ, to je preračunano na kubični decimeter kisika $2,87 \text{ MJ}/136 = 21 \text{ kJ}$ in na gram glukoze $2,87 \text{ MJ}/180 = 16 \text{ kJ}$. Pri nespremenjeni temperaturi se prostornina ne spremeni znatno, če je voda v kapljevinskem stanju; na začetku in na koncu imamo 6 molov plina. Pri drugih sestavinah hrane dobimo podobne vrednosti, kot kaže prva preglednica.

snov	sprememba "notranje energije" na maso	sprememba "notranje energije" na prostornino kisika
ogljikov hidrat	17 kJ/g	21 kJ/dm ³
beljakovina	18	19
maščoba	39	20

V povprečju smemo računati, da 1 dm^3 porabljenega kisika ustreza 20 kJ. V podrobnosti je poraba kisika odvisna od sestava hrane. Vrhunski športnik lahko v minuti porabi na kilogram mase po 70 cm^3 kisika in se po tem razlikuje od zapečkarja, ki zmore le 4 desetine tega.

Druga preglednica vsebuje nekaj podatkov o tem, kolikšna je poraba kisika na kilogram mase človeka in na minuto in kolikšna oddana mehanična moč.

opravilo	poraba kisika	oddana moč
sprehod, delo doma	$10 \text{ cm}^3/\text{kg}\cdot\text{m}$	230 W
kolesarjenje 16 km/h, prsno plavanje 1,6 km/h	20	465
nogomet, žaganje drv	25	580
košarka	30	700
dirkač na kolesu 44 km/h	70	1500

Človek lahko razvije zelo veliko moč, na primer 1500 W, a le zelo kratek čas 6 s, moč 750 W zmore 1 minuto, moč 240 W zmore 35 minut in moč 150 W zmore 5 ur. Podatki so približni in prvi zadevajo vrhunske športnike. Tudi ko počivamo in ne oddajamo mehanične moči, oddajamo toplotni tok okoli 80 W.

Po ustaljeni navadi lahko določimo izkoristek človeškega stroja P/P_k . Pri kolesarjenju dosežemo 0,19, pri potiskanju vozila malo manj, pri premetavanju peska z lopato pa veliko manj. James Joule je izkoristek konja ocenil že leta 1864. V 24 urah lahko konj opravi delo 38 MJ in poje 6 kg sena in 6 kg ovs. Na kilogram hrane odpade tako 3,2 MJ dela. Pri sežigu 1 kg mešanice sena in ovs v kisiku se sprosti 12,8 MJ toplote, tako da je izkoristek $3,2/12,8 = 0,25$.

Po podatkih za izkoristek sklepamo, da človeško ali živalsko telo ne deluje podobno kot parni stroj, pri katerem je izkoristek odvisen od razlike najvišje temperature in temperature okolice. V takem stroju bi morala biti temperaturna razlika vsaj 75 stopinj, da bi dosegel izkoristek 0,2. Tako visoke temperature telo ne bi preneslo. Delovanje človeškega telesa bolj spominja na galvanski člen, ki mu pogosto dodamo novo snov za elektrodi in elektrolit.

Morda na podobnost s parnim strojem napelje podatek o sežigni toploti. Zares spremembo "notranje energije" pri oksidaciji navadno izmerimo pri sežigu v kisiku. Toda človeškemu ali živalskemu telesu hrane ni treba najprej sežgati in potem nastalo toploto izkoristiti, kot jo izkoristi parni stroj. Pač pa v mišicah poteka pet vrst dokaj zapletenih kemijskih reakcij. Pri treh od njih se ob razgradnji snovi v telesu in ob razgradnji hrane energija sprošča. Pri preostalih dveh pa na novo nastaneta snovi, ki sta se prej razgradili, za kar se porabi energija, sproščena ob razgradnji hrane. Precejšen del sproščene energije se porabi za delo pri krčenju mišic in nastane precej manj toplote kot ob sežigu v kisiku.

Janez Strnad
