

Energija III: Toplota, delo in notranja energija

dr. Mojca Čepič

Univerza v Ljubljani, Pedagoška fakulteta, Oddelek za fiziko in tehniko

Do sedaj smo se ukvarjali predvsem z mehanskim delom in mehanskimi energijami [1, 2]. Zdaj pa se posvetimo prenosu energije zaradi temperaturnih razlik, toplotnemu toku oziroma toploti. Tudi pri tem bomo obravnavali reči/telesa kot celote, čeprav jih sestavljajo različne sestavine. Ponovimo definiciji dela in toplote:

Mehansko delo A imenujemo preneseno energijo z ene reči na drugo zaradi sil med njima.

Toploto Q imenujemo preneseno energijo s kraja A z višjo temperaturo na kraj B z nižjo temperaturo, če se energija prenaša med različnima rečema.

Pri tem ne pozabimo, da nam sama definicija ne omogoča niti izračuna niti merjenja velikosti prenesene energije. Na velikost prenesene energije lahko sklepamo iz spremembe lastnosti reči ali pa jo izračunamo iz izrazov, ki prenos energije kvantificirajo.

$$A_B = \int_{\vec{r}_2}^{\vec{r}_1} \vec{F}_{AB}(\vec{r}) \cdot d\vec{r}. \quad (1)$$

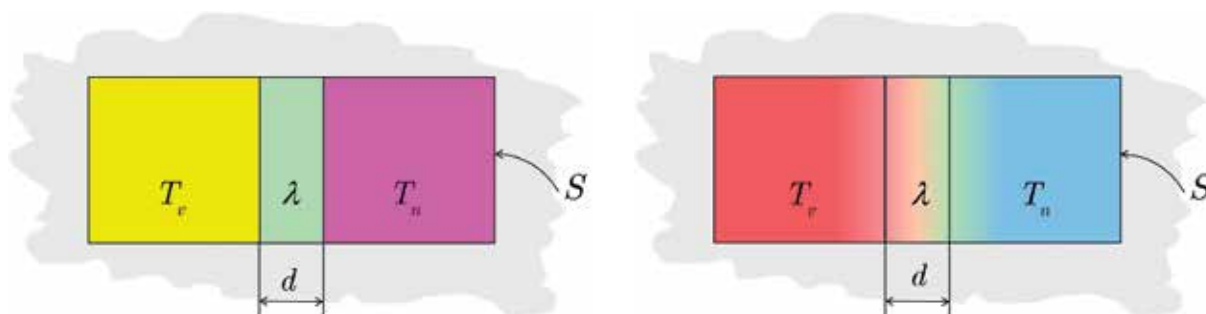
V izrazu (1) je delo, ki ga prejme reč B zaradi sile, s katero reč A deluje na reč B, odvisno od premikanja prijemališča te sile po prostoru ter od odvisnosti smeri in velikosti sile od lege prijemališča. Toplota Q_{BA} , ki jo reč B prejme od reči A, je trši oreh. Koliko energije je B prejela od A, določa izraz

$$Q_{BA} = \int_{t_2}^{t_1} P_{Q,BA}(t) dt, \quad (2)$$

kjer je $P_{Q,BA}(t)$ časovno odvisni toplotni tok med predmetoma z različno temperaturo. Toplotni tok je posledica treh različnih procesov: prevajanja toplote ali kondukcije skozi trdne snovi, konvekcije v tekočinah in sevanja, ki kot mehanizem za prenos toplote ne potrebuje medija. Med temi tremi procesi je najpogosteje podrobneje obravnavano prevajanje toplote. Običajno je v šoli odvisnost toplotnega toka zaradi prevajanja obravnavana z izrazom, ki velja le za stacionarne razmere v enostavnih geometrijah.

$$P_Q = -\lambda \frac{S}{d} (T_v - T_n). \quad (3)$$

Na toplotni tok vpliva kar nekaj lastnosti reči in fizikalnih količin, zato so ponazorjene še na sliki 1. Izraz (3) pravi, da je toplotni tok, ki teče skozi površino S , sorazmeren s temperaturno razliko med rečjo z višjo temperaturo T_v in rečjo z nižjo temperaturo T_n na obeh straneh prevodne plasti, s toplotno prevodnostjo λ plasti in obratno sorazmeren z njeno debelino d . Celota mora biti izolirana, da so razmere opredeljene tako natančno, kot opisuje izraz. Še več. Izraz opisuje le stacionarne tokove, kar pomeni, da se je vmesna plast že ogrela ali ohladila in se temperatura skozi prevodno plast spreminja linearno z oddaljenostjo od površine. Opis približno velja za ocene toplotnega toka pri stacionarnih okoliščinah, kot je toplotni tok skozi stene ogrevanega prostora, za toplotni tok iz okolice v hladilnik in podobno. Za običajna ohla-



Slika 1: Ilustraciji ponazarjata idealizirano obravnavo toplotnega toka med dvema rečema z različnima temperaturama. (a) Barve ponazarjajo le različne reči, med katerimi ali skozi katere poteka izmenjava energije s toplotnim tokom. Siva okolica predstavlja dodatno izolacijo, ki je potrebna, da lahko sistem tako poenostavimo. (b) Ilustracija poskuša ponazoriti tudi dejanski temperaturni profil med procesom. Temperatura je lastnost kraja in se med procesom s časom in krajem zvezno spreminja. Na sliki je ponazorjena z barvo, rdeči toni predstavljajo višje temperature in modri nižje. Toplotni tokovi tečejo tudi znotraj reči, kar vpliva na izmenjavo energije med telesoma, saj je temperatura ob stikih s prevodno plastjo običajno drugačna kot v notranjosti reči.

janja in ogrevanja predmetov, torej reči, v katerih ni notranjih procesov, ki spreminjajo oblike energij med seboj, pa vedno velja, da se temperatura s časom in krajem spreminja. Vroča opeka v termoakumulacijski peči ima na površini nižjo temperaturo kot v notranjosti. Tudi v sobi je temperatura ob zunanjih stenah drugačna kot ob notranjih. Vse te okoliščine natančneje

obravnava z izrazom za gostoto toplotnega toka, ki ga vpeljemo šele na univerzitetni ravni in velja vedno, kadar temperatura po prostoru ni povsod enaka. Gostota toplotnega toka je intenzivna vektorska količina, ki je odvisna od krajevne odvisnosti temperature in toplotne prevodnosti snovi in jo podaja izraz

$$\vec{j}(\vec{r}) = -\lambda \nabla T(\vec{r}), \quad (4)$$

kjer gostota toplotnega toka $\vec{j}(\vec{r})$ označuje toplotni tok na površinsko enoto in ima smer največjega padanja temperature v prostoru. Toplotna prevodnost λ je tenzorska količina. Tenzorski značaj toplotne prevodnosti si zlahka predstavljamo ob lesu. Prečno na lesna vlakna je toplotni tok ob enaki temperaturni razliki in debelini lesa drugačen kot vzdolž njih, ker se les v vseh smereh ne obnaša enako. Pravimo, da je les anizotropen. Običajni izolacijski materiali imajo lastnosti za toplotne tokove enake v vseh smereh in se z anizotropijo toplotne prevodnosti ni treba ukvarjati. Izraz (3) je poenostavitev izraza (4), saj v njem gradient temperature ∇T zamenja temperaturna razlika na enoto dolžine $(r_v - r_n)/d$. Za običajne razlage z mahanjem rok so dovolj odvisnosti, zapisane v (3).

Prav tako ima izraz, ki opisuje sevanje teles, dobro napovedno moč, čeprav izmenjavo energije preko sevanja pogosto kar zanemarimo ali jo obravnavamo bolj kot posebnost. Toplotni tok zaradi sevanja je

$$P_q = \sigma S T^4, \quad (5)$$

pri čemer je v (5) σ Štefanova konstanta, S površina sevajoče reči in T temperatura, izražena v Kelvinih. Sevajo vse reči, saj absolutne ničle ni mogoče doseči. To, da se vsi nahajamo v kopeli sevanja iz vseh površin okoli nas, ima še eno posledico, ki jo pogosto v obravnavah pozabimo. Namreč, energijo tudi prejemo zaradi sevanja okoli nas. Zapišimo toplotni tok zaradi sevanja reči s temperaturo T_v , ki jo obdaja okolica z nekaj nižjo temperaturo $T_v - \Delta T$, na naslednji način:

$$P_Q = -\varepsilon(T_v) \sigma S T_v^4 + (1 - a)(T_v - \Delta T) \sigma S (T_v - \Delta T)^4. \quad (6)$$

Prvi člen v enačbi (6) predstavlja izsevan toplotni tok reči z višjo temperaturo T_v , na katero se osredotočamo v enačbi. Prvi faktor ε je emisivnost, za katero pogosto pozabljamo, da je odvisna tudi od valovne dolžine elektromagnetnega valovanja. Emisivnost je za sevanje vseh teles v infrardečem spektru, značilnem za sobne temperature in temperature blizu njih, običajno kar enaka 1. Od temperature okolice je odvisen toplotni tok, ki ga telo prejema, in ga podaja drugi člen. V njem je eksplicitno zapisana odbojnost ali albedo α , ki pove delež sevalnega toplotnega toka, odbitega od površine. Tudi za albedo oziroma absorpcijo velja, da sta odvisna od valovne dolžine elektromagnetnega valovanja. V infrardečem spektru je odbojnost vseh teles približno enaka 0, lahko bi rekli, da so v infrardeči svetlobi vsa telesa črna. Ker sta koeficient absorpcije in emisivnost oba približno enaka 1, ju bomo v nadaljevanju izpustili. V izrazu (6) smo predpostavili, da se temperatura okolice za ∇T »razlikuje« od temperature reči. V običajnih okoliščinah to pomeni 10 do 20 K. Izpeljimo razliko med oddanim in prejetim tokom, če velja, da je $\Delta T \ll T$, kot lahko pričakujemo, če sta temperaturi telesa in okolice približno enaki.

$$\begin{aligned} P_Q &= -\sigma S T_v^4 + \sigma S (T_v - \Delta T)^4 \\ &= -\sigma S T_v^4 + \sigma S T_v^4 \left(1 - 4 \frac{\Delta T}{T_v} + 12 \frac{\Delta T^2}{T_v^2} - 4 \frac{\Delta T^3}{T_v^3} + \frac{\Delta T^4}{T_v^4} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

Če je razmerje $\Delta T/T_v$ manjše od 0,1, v oklepaju obdržimo le $\left(1 - 4 \Delta T/T_v \right)$, ostale člene v oklepaju pa lahko zanemarimo in izraz se poenostavi v

$$P_Q = -\left(4\sigma S T_v^3 \right) \Delta T, \quad (8)$$

ki pa je po obliki enak izrazu (3), le da so prevodne »lastnosti« vakuuma, skozi katerega se širi sevanje, odvisne od temperature. Podoben približek se pogosto uporablja tudi pri konvekciji, kjer predpostavimo, da je toplotni tok sorazmeren razliki temperatur. V priročnikih je mogoče

najti koeficiente, ki opisujejo prevajanje toplote v stiku trdnih reči s tekočinami. Skratka, za večino procesov prenosa toplote v vsakdanjem življenju velja, da so neposredno sorazmerni razliki temperatur med reči (krajji), med katerimi izmenjava energije v obliki toplote poteka. Ni pa to res za reči oziroma vesoljska telesa, ki jih osvetljuje Sonce. Tedaj sta temperaturi Sonca, ki s sevanjem toploto oddaja, in reči, ki toploto prejema, npr. naš hrbet, zelo različni in členov v oklepaju enačbe (7) ne moremo več zanemariti. Zato je treba upoštevati odvisnost absorpcije in emisivnosti od valovne dolžine oziroma od temperature. Lep primerek je barva oblačil. Bela oblačila imajo v vidni svetlobi velik albedo, zato precej sončne svetlobe odbijejo. Človek pa seva v infrardečem področju, kjer je tudi emisivnost belega oblačila blizu 1. Zato so svetla oblačila primerna za poletje, saj se manj ogrejejo kot temna. Razlog pa se skriva v različni emisivnosti (in s tem tudi albedu) v različnih delih sevalnega spektra. Velja omeniti še, da kadar reči prejema toploto zaradi sevanja (npr. ko se postavimo pred vročo peč), toplotni tok prejemo le z ene strani, zaradi sevanja pa ga oddajamo skozi celotno površino. Med prejetim in oddanim toplotnim tokom se pri določeni temperaturi vzpostavi ravnovesje. Ta temperatura je bila v Apollu 13, ko so po nesreči izklopili gretje, okoli 3 °C [3].

Preden nadaljujemo, opredelimo še eno preciznost strokovne govornice, in sicer razliko med pomenoma besed »razlika« in »sprememba«.

»Razlika« pomeni, da je temperatura na dveh različnih krajih različna v istem trenutku. »Razlike« fizikalnih količin ali lastnosti se vedno povezujejo s krajem. Govorimo o razlikah v temperaturi, gostoti, barvi, tlaku, hitrosti na različnih krajih v tekočini, potencialu, gravitacijskem, električnem ali magnetnem polju ... Opisujejo jih izrazi: lastnost je na kraju \vec{r}_2 večja, manjša, višja, nižja ... kot na kraju \vec{r}_1 .

Včasih namesto izraza »razlika« uporabljamo izraz »sprememba«. »Sprememba« opisuje neko lastnost istega telesa ali istega kraja, vendar ob različnih časih. Spremembo opisujejo izrazi: se poveča, se zmanjša, naraste, pade, zviša, zniža, se zmehča, se strdi itd. Ti izrazi opisujejo, kako se je lastnost spremenila glede na začetno stanje pred tem. Kako to, da se v pogovor hitro prikrade »sprememba«? Razlog za to je zelo verjetno antropomorfni pogled na dogajanja. Razpravljavec si predstavlja, da si ogleda ali izmeri eno lastnost na dveh različnih krajih. Če meri sam, lahko to naredi le zaporedoma, najprej na prvem, nato še na drugem kraju. Zato podzavestno uporabimo besedo »sprememba«, saj se je za tistega, ki meri, ta lastnost spremenila. Ker imata v strokovni govornici »razlika« in »sprememba« natanko določen pomen, je smiselno, da se učitelj trudi vedno uporabljati pravilni izraz. To je najočitneje pri toplotnih tokovih, ki povzročijo spreminjanje temperature reči. Ker se temperatura reči *razlikuje* od okolice, reč toploto prejema/oddaja in se ji zato lahko *spremeni* temperatura. Tako razlike kot spremembe označujemo z istim simbolom Δ . Pri obravnavi pravkar omenjenega primera pa sta razlika v temperaturi in sprememba temperature povezani v istem izrazu, zato je ozaveščanje pomena razlik in sprememb še kako pomembno. A rada priznam, da se tudi meni včasih pri razlikah in spremembah zaplete jezik.

Do sedaj smo obravnavali procese, ki opredelijo toplotni tok $P_o(T)$ v izrazu (2). Sedaj pa se na kratko osredotočimo še na posledice prejemanja toplote. Zaradi prejete toplote se telesu *spremeni* notranja energija, včasih pa se del prejete toplote pretvori tudi v mehansko energijo. Na primer, balon z vročim zrakom se dviguje, zrak se dviga nad ogretim pobočji in piha vzgonski veter, ogreta para žene parne turbine in še mnogo drugega. Zato toplotni stroji delujejo, a za zdaj se z njimi (še) ne ukvarjamo. V obravnavi izmenjave energije zaradi temperaturnih razlik se omejimo le na spremembe notranje energije. To običajno zapišemo s tremi enačbami

$$Q = m c \Delta T, \quad (9a)$$

$$Q = C \Delta T, \quad (9b)$$

$$Q = m q_x. \quad (9c)$$

V vseh treh izrazih je na levi strani toplota, ki jo telo prejme ali odda. Za ugotavljanje posledic prejete toplote navadno ne razpravljamo o virih te toplote, ker so iz opisa okoliščin dobro opredeljeni. Na desni strani pa se nahaja »sprememba« notranje energije telesa, ki je toploto prejelo.

Bela oblačila imajo v vidni svetlobi velik albedo, zato precej sončne svetlobe odbijejo. Človek pa seva v infrardečem področju, kjer je tudi emisivnost belega oblačila blizu 1. Zato so svetla oblačila primerna za poletje, saj se manj ogrejejo kot temna.

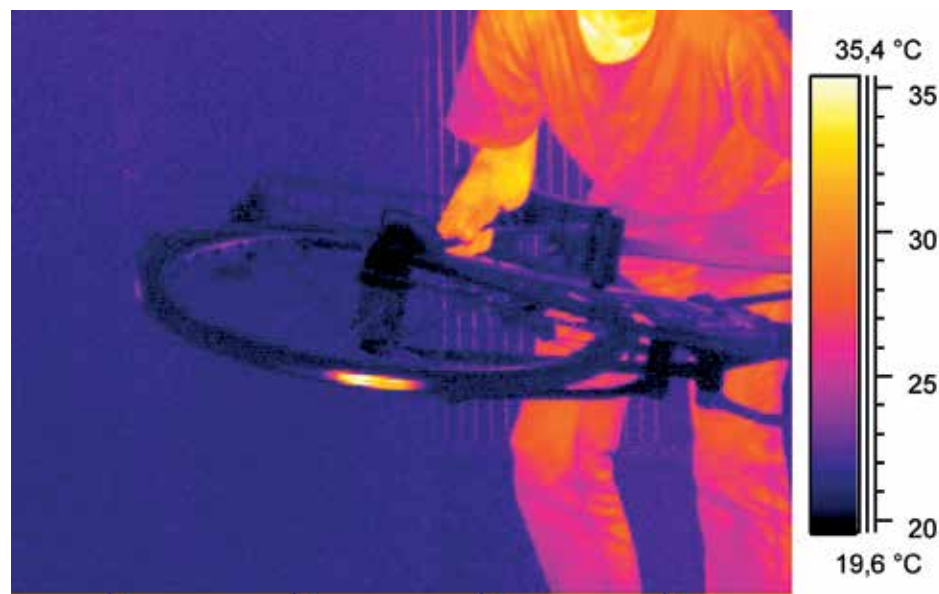
»Razlika« pomeni, da je temperatura na dveh različnih krajih različna v istem trenutku. »Razlike« fizikalnih količin ali lastnosti se vedno povezujejo s krajem.

Da je na desni »notranja energija«, običajno ozaveščamo le takrat, kadar obravnavamo pline, ki zaradi raztezanja opravljajo tudi delo, oziroma kadar eksplicitno obravnavamo kot zahtevnejšo vsebino razliko med specifičnima toplotama pri stalni prostornini (c_v), pri kateri dovedena toplota spremeni le notranjo energijo, in stalnem tlaku (c_p), pri katerem plin zaradi raztezanja ob gretju opravi tudi delo na okolici. Pri spremembah notranje energije trdnih teles in kapljev in razlikovanje med c_p in c_v ni potrebno, ker so spremembe prostornine zelo majhne. V izrazu (9a) je sprememba notranje energije odvisna od mase telesa m , ki je prejelo/oddalo toploto, in od specifične toplote c , značilne za snov. Podobno velja za izraz (9b), kjer je telo sestavljeno iz delov iz različnih snovi, in zato podajamo toplotno kapaciteto C celotnega telesa. V obeh izrazih nastopa »sprememba« temperature telesa ΔT . Zadnji izraz (9c) predstavlja fazni prehod, pri čemer je masa m spremenljivka in se nanaša na del, ki se mu je zaradi dovedene toplote spremenila faza, q_x pa predstavlja »skrito« toploto, kjer x stoji namesto talilne, izparilne, sublimacijske, a tudi sežigne toplote. Že izraz »skrita« toplota pove, koliko je terminološko pogojenih namigovanj v strokovnih izrazih. Izraz namreč namiguje, da bi se zaradi dovedene ali odvedene toplote morala spremeniti temperatura, če pa se ne, se je ta toplota nekam skrila. To, da je led začel teči, pa pomeni dim?

Izrazi (9a–9c) imajo še eno lastnost, ki otežuje poučevanje. Izrazi, ki predstavljajo odvisnosti, so običajno napisani tako, da so posledice na levi strani izraza, vzroki zanje pa na desni. Se pravi, količina na levi je odvisna od količin na desni. A nekaj pomembnih izrazov podaja dejstva, da na vzroke lahko sklepamo le iz posledic in da vzroki niso neposredno opazljivi oziroma merljivi. Poleg izrazov (9a–9c) so taki še drugi Newtonov zakon, Hookov zakon, Ohmov zakon pa še kakšen bi se našel. Učencem je ta obratni razmislek težaven. Gotovo ste že srečali učenca, ki je na vprašanje: »Kako lahko telesu dovedemo toploto?« odgovoril: »Tako, da mu povečamo temperaturo.«

Izrazi (9a–9c) so eni od najbolj zasidranih izrazov v glavah učencev. A žal jih pogosto spremlja tudi napačna interpretacija v smislu – za vsako spremembo temperature je vzrok dovedena/odvedena toplota. Napačnost te interpretacije naj ilustriram z dvema primeroma iz vsakdanjega življenja.

Naloga: Kolesar z maso 80 kg pelje kolo z maso 20 kg po cesti s hitrostjo 36 km/h. Ker zagleda na cesti oviro, nenadoma zavre. Za koliko se zaradi zaviranja segreje železni obroč kolesa z maso 1 kg in s specifično toploto 460 J/kg K?



Slika 2: Infrardeča fotografija kolesa je nastala tako, da je eksperimentator na sliki na kratko pritisnil na zavoro. Gumijasta zavora je podrsala po obroču kolesa in ta se je segrel. Področje z višjo temperaturo na obroču kolesa kaže, kje je zavorna gumica drsala ob kolo. Sliko je prijazno prispeval avtor članka [4] Michael Vollmer.

»Sprememba« opisuje neko lastnost istega telesa ali istega kraja, vendar ob različnih časih.

Tak tip naloge je pogost. Dogajanje lahko danes lepo spremljamo z infrardečo kamero, zato je naloga postala tudi avtentična. Še danes se spominjam, kako sem zapisala nastavek za to nalogo v gimnaziji in izračunala pravilni odgovor $11\text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$\frac{1}{2}(m_{\text{kolesar}} + m_{\text{kolo}})v^2 = Q = m_{\text{obr}}c_{\text{Fe}}\Delta T_{\text{obr}} \quad (10)$$

V enačbi je $(m_{\text{kolesar}} + m_{\text{kolo}})$ masa kolesa in kolesarja, ki se gibljeta s hitrostjo v , na skrajni desni pa se količine z oznako »obr« nanašajo na lastnosti in spremembo temperature obroča. Razmislek pravi, seveda, kinetična energija kolesarja in kolesa se je spremenila v toploto, toplota pa je segrela obroč. Tak razmislek ste zagotovo že srečali pri svojih učencih in nedvoumno kaže, kako globoko je v glavah zakoreninjena povezava, da je s spremembo temperature vedno povezana toplota. Če se zanesemo na definicijo toplote, to je energije, ki se prenese s telesa z višjo temperaturo na telo z nižjo, takoj vidimo, da je bil razmislek napačen. Zavore se namreč niso segrele zaradi izmenjave energije s telesom z višjo temperaturo od njih. Segrele so se zato, ker se je kinetična energija zaradi sile med zavorno gumico in obročem spremenila v notranjo energijo obroča. Pravilni zapis razmisleka je naslednji:

$$\begin{aligned} \Delta W_{k,\text{avto}} + \Delta W_{n,\text{avto}} &= 0 \\ -W_{k,\text{avto}} &= -\Delta W_{n,\text{avto}} \\ \frac{1}{2}m_{\text{avto}}v_{\text{avto}}^2 &= m_{\text{zavore}}c_{\text{zavore}}\Delta T_{\text{zavore}}. \end{aligned} \quad (11)$$

Če kolo med zaviranjem ni drselo, se je celotna energija avtomobila ohranila (11, prva vrstica), za kolikor se je zmanjšala kinetična energija, se je povečala notranja (11, druga vrstica). Med preurejanjem enačbe se je pojavil negativen predznak na levi zato, ker kolo na koncu miruje. Zadnja vrstica v (11) je zelo podobna napačni povezavi v (10), ki pa postane pravilna takoj, ko izpustimo neobstoječo toploto (11).

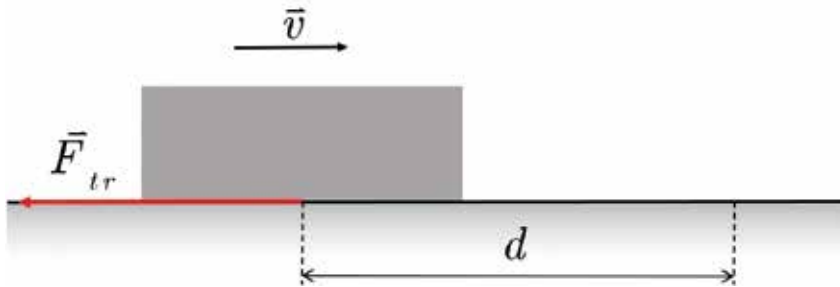


Slika 3: Infrardeča kamera kaže kolo in njegovo okolico po zaviranju z zablokiranim kolesom, ki je drselo po podlagi. Sled zaviranja je vidna kot podlaga z višjo temperaturo, temperatura obroča kolesa pa se ni zvišala. Sliko je prijazno prispeval avtor članka [4] Michael Vollmer.

Sedaj pa razmislimo še, zakaj je bila potrebna pripomba, »če kolo ni drselo« (slika 3). Drsenje po podlagi je prisotno pri vožnji s kolesom, kadar močno stisnemo zavore in preprečimo vrtenje kolesa, pa tudi pri speljevanju kolesa na strmini in vedno pri pisanju s svinčnikom.

Nadaljujmo analizo dogajanja pri zaviranju s kolesom, če se med zaviranjem kolesa ne vrtijo in po podlagi drsijo. Poglejmo dogajanje najprej z energijskega stališča. Med drsenjem se kolesa ne vrtijo, se pa poveča njihova temperatura in zato notranja energija zaradi drsenja

po podlagi. Prav tako se poveča notranja energija tal, po katerih drsi kolo, in zato njihova temperatura (slika 3). V srednji šoli se lahko pogovarjamo o energiji sistema, ki ga sestavlja več različnih komponent, npr. kolo in njegova okolica. Pri tej obravnavi je trenje notranja sila v sistemu, ki omogoča pretvorbo kinetične energije kolesa v povečano notranjo energijo kolesa oziroma njegovih gum in okolice oziroma njenega dela na podlagi, kjer je kolo drselo. Razmislek je eleganten in enostaven. Seveda nimamo mehanizmov, da bi izračunali, koliko se je segrel del okolice in koliko del kolesa, lahko pa z modernimi pripomočki, kot je infrardeča kamera, spremembe temperature izmerimo (sliki 2 in 3).



Slika 4: Klada drsi po podlagi in se zaradi trenja ustavlja. Ustavi se na razdalji d .

Ko govorimo o celotni energiji, ostajamo vezani na reči. Običajno zanemarjamo izmenjavo snovi z okolico, npr. pri oceni energije človeka ne upoštevamo izmenjave snovi preko dihanja, pogosto zanemarimo tudi izmenjavo energije preko sevanja. Zato so energijske razprave praviloma enostavnejše, niso pa popolnoma korektne. Tem zadregam se izognemo, če analiziramo energijske pretvorbe in izmenjave energij na enostavnih telesih oziroma modelih. Drseče kolo ponazorimo s klado, ki drsi po podlagi, dokler se ne ustavi (slika 4). Poskusimo z energijskega stališča obravnavati klado/drseče kolo ločeno od okolice, ker pri okolici lahko govorimo zgolj o spremembah energije, o celotni energiji pa ne. Energija klade, preden se začne ustavljati, je sestavljena iz kinetične in notranje energije.

$$W_k + W_n = \frac{1}{2} m_{\text{klada}} v_{\text{klada}}^2 + W_n \quad (12)$$

Kinetično energijo lahko izračunamo, pri notranji pa bomo opazovali le njene spremembe. Med ustavljanjem sta se zaradi trenja segreli tanki plasti klade in podlage ob stični površini. Iz ogrelih področij so stekli toplotni tokovi v manj ogreta področja, a gostota energije se je samo prerezporejala, energija klade in okolice pa je ostala enaka. Koliko energije se je spremenilo v notranjo energijo klade in okolice, pove enostaven račun. Izhajamo iz drugega Newtonovega zakona, upoštevamo, da je končna hitrost enaka 0 in da je pospešek negativen.

$$\begin{aligned} v_k - v_z &= -2|a|d = -2\frac{F_{tr}}{m}d \\ \frac{1}{2} m_{\text{klada}} v_{\text{klada}}^2 &= F_{tr}d \end{aligned} \quad (13)$$

Za drugo vrstico v (13) smo ponovno v skušnjavi kot že v prispevku [2], da bi desno stran enačbe imenovali delo sile trenja. O delu sile trenja obstajajo številne razprave med fiziki, poučevalci in drugimi, ki o vsem vse vedo, zato se seveda ne morem upreti skušnjavi, dodati še svoj »piskrček«. Razlago v nadaljevanju vzemite kot moj predlog in jo uporabite, če se vam zdi smiseln.

Kje je pravzaprav problem? Prvič, če je delo prenos energije med rečmi preko sil, potem del izraza na desni strani ne izpolnjuje tega kriterija, saj se del kinetične energije pretvori v notranjo energijo iste reči, klade/drsečega avtomobila. Drugič, del energije se prenese med klado in okolico in zato se segreje podlaga. Ta del izpolnjuje vse kriterije, potrebne za obstoj dela: obstajajo sile med rečema, trenje: eni reči, kladi, se celotna energija zmanjša, drugi reči, podlagi, pa se poveča. Tretjič, za izračun velikosti energije, prenesene preko sil, mora biti dobro opredeljeno prijemališče sile, česar pa pri trenju ne moremo opredeliti, saj interakcije pote-

kajo po vsej stični ploskvi. Zato dela ne moremo, vsaj enostavno ne, izračunati. Lahko pa z gotovostjo trdimo naslednje, sila trenja omogoči pretvorbo dela kinetične energije v notranjo energijo klade/drsečega kolesa in omogoči prenos preostalega dela energije preko sil na podlago. Ta drugi del moramo obravnavati kot delo, ki ga omogoča trenje, če izhajamo iz osnovne definicije dela kot prenosa energije preko sil. Zapišimo to še formalno:

$$\begin{aligned} F_{tr}d &= \eta F_{tr}d + (1-\eta)F_{tr}d; \\ \eta F_{tr}d &= \Delta W_{n,klada}; \\ A_{tr} &= (1-\eta)F_{tr}d \end{aligned} \quad (14)$$

Povzemimo gornji razmislek še z energijskega stališča:

$$\begin{aligned} A_{tr} &= \Delta W_{okolica} = W_{n,okolica} = (1-\eta)F_{tr}d; \\ \Delta W_{klada} &= \Delta W_{k,klada} + \Delta W_{n,klada} = \eta F_{tr}d. \end{aligned} \quad (15)$$

V izrazu (15) smo eksplicitno zapisali prenos energije s klade na okolico preko sile trenja in pretvorbo kinetične energije klade v notranjo energijo klade, ki jo je omogočilo trenje, ne moremo pa te pretvorbe obravnavati kot delo trenja, saj je »lastnik« te energije še vedno klada.

Žal ne vemo, v kakšnem razmerju η sta pretvorjena in prenesena energija, saj je to odvisno od snovi, hrapavosti itd. A tudi v analizi, kjer je sistem vseboval klado in okolico, tega nismo mogli opredeliti. Le formalno razprava o delu ni bila potrebna. Kateri način, ločena telesa ali kompleksen sestavljen sistem, je boljši za poučevanje, sprejemljivejši učencem, nazornejši za uporabo in kako je z uporabo enega ali drugega na različnih stopnjah izobraževanja, ne vem. Potrebna bi bila raziskava. A na tem mestu lahko vas, učitelje, prosim le za povratno informacijo.

Zahvala

Zahvaljujem se prof. dr. Michaelu Vollmerju z Univerze za uporabne znanosti v Brandenburg (University of Applied Sciences Brandenburg), Nemčija, da je posredoval svoje fotografije, narejene z infrardečo kamero, in dovolil njihovo uporabo. Prav tako se zahvaljujem recenzentu za zelo konstruktivne pripombe, zaradi katerih je prispevek zagotovo veliko boljši.

Viri in literatura

- [1] Čepič, M. (2017) Energija in delo, *Fizika v šoli* 22(1), str. 55–59.
- [2] Čepič, M. (2017) Energijski zakon in primeri iz vsakdanjega življenja, *Fizika v šoli* 22(2), str. 54–59.
- [3] <https://history.nasa.gov/SP-350/ch-13-5.html>, (11. aprila 2018).
- [4] Vollmer, M., Moelmann, K. P., Pinno, F., Karstaedt, D. (2001). There is more to see than eyes can detect, *The Physics Teacher* 39(7), str. 371–376.