
Konceptualni test molekularno-kinetičke teorije plina - suvremeni metodički alat za kreiranje učinkovite nastave fizike

Nataša Erceg¹, Ivica Aviani^{2,3}, Vanes Mešić⁴, Matko Glunčić⁵ i Gordana Žauhar^{1,6}

¹*Odjel za fiziku Sveučilišta u Rijeci, Rijeka*

²*Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Splitu, Split*

³*Institut za fiziku, Zagreb*

⁴*Prirodno-matematički fakultet Univerziteta u Sarajevu, Sarajevo*

⁵*Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb*

⁶*Medicinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka*

Sažetak. Edukacijska istraživanja ukazuju na brojne učeničke i studentske miskoncepcije te na slabo razumijevanje mikroskopskog modela tvari. Za kreiranje učinkovitije nastave, preporuča se sagledati postojeće pogrešne ideje kao važan dio učeničkog/studentskog konceptualnog okvira te kvalitetan fizički model izgrađivati uz ispravljanje njihovih miskoncepcija. Konceptualni testovi predstavljaju jedan od suvremenih metodičkih alata za procjenu znanja i detekciju miskoncepcija. Saznavši da ne postoje takvi testovi za procjenu učeničkog/studentskog razumijevanja molekularno-kinetičke teorije, radom [1] nastojali smo dati originalan doprinos području edukacijske fizike. Važan korak u našem pristupu bila je radna pretpostavka da uzrok velikom broju studentskih miskoncepcija mogu biti upravo nelogičnosti i slabosti modela idealnog plina. Osmislili smo konceptualni test s pitanjima višestrukog izbora iz molekularno-kinetičke teorije plina (MKTP). Kao distraktori su nam poslužili odgovori studenata koje smo prethodno intervjuirali, postavljajući im jednaka pitanja otvorenog tipa. Neki od njihovih odgovora potvrdili su već poznate miskoncepcije, dok su drugi (posebice oni koji su se odnosili na međumolekularnu potencijalnu energiju) otkrili neke nove pogrešne ideje. Uz pomoć tako dobivenog testa, ispitali smo studente s različitih Sveučilišta u RH. Ustanovili smo veliku zastupljenost miskoncepcija, nekonzistentnih odgovora te, što je posebno indikativno, sličnu raspodjelu odgovora na većinu pitanja kod svih grupa ispitanika.

Ključne riječi: molekularno-kinetička teorija, plin, MKTP konceptualni test.

UVOD

Većina učenika i studenata postaje svjesna čestične prirode tvari još u osnovnoj školi, a molekularno-kinetičku teoriju uči u okviru mnogih uvodnih kolegija fizike i kemije, te kasnije u okviru specijaliziranih kolegija, poput termodinamike i statističke fizike [2]. Unatoč tome, edukacijska istraživanja pronalaze brojne učeničke i studentske miskoncepcije, koje ukazuju na kvalitativno nerazumijevanje mikroskopskog modela tvari [1, 3].

Primjer koji nam to može potvrditi i ujedno poslužiti kao motivacija je sljedeći. Uočili smo da učenici, studenti i nastavnici fizike imaju poteškoća s razumijevanjem fizikalne situacije koja se može naći već u udžbeniku fizike za osnovnu školu [4]. Konkretno, zadana je situacija u kojoj treba odrediti temperaturu i usporediti unutarnje termalne energije jednakih količina tekuće vode, vodene pare i leda, koji nastaju taljenjem leda ubačenog u čašu vode na sobnoj temperaturi. Iako učenici, studenti i nastavnici deklarativno znaju da temperatura smjese leda i vode iznosi 0 °C te da se ona ne mijenja dok se led tali, u ovoj situaciji se ne pozivaju na ta znanja. Sasvim suprotno, gotovo svi pogrešno odgovaraju da led ima najmanju, tekuća voda veću, a vodena para najveću temperaturu. S druge strane, ispravno smatraju da je unutarnja termalna energija odgovarajuće

količine leda najmanja, a unutarnja termalna energija jednake količine pare najveća. Međutim, pritom potpuno zanemaruju međumolekularnu potencijalnu energiju koja u danj situaciji ima ključan doprinos za unutarnju termalnu energiju, pogrešno smatrajući da voda i para imaju veću unutarnju termalnu energiju od leda zbog veće kinetičke energije njihovih molekula, što je povezano s pogrešnim odgovorom vezanim uz temperaturu.

Mogući uzrok ovakvim pogrešnim odgovorima pronašli smo u činjenici da se koncept unutarnje termalne energije najvećim dijelom obrađuje u okviru modela idealnog plina, u kojemu se zanemaruje međumolekularna potencijalna energija. Nastavno na to, postavlja se pitanje kakvo je konceptualno razumijevanje modela idealnog plina i najjednostavnijeg realnog modela, tj. modela realnog plina.

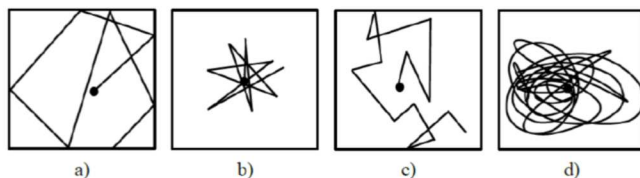
Suvremena metodička literatura preporuča da se za kreiranje učinkovite nastave fizike, postojeće pogrešne ideje postave kao polazišne točke za otkrivanje konceptualnog okvira učenika i studenata [1, 5-7] te da se kvalitetan fizički model izgrađuje uz ispravljanje njihovih miskoncepcija [8]. Jedan od suvremenih metodičkih alata za uvid u konceptualni okvir je konceptualni test. Onaj vezan za molekularno-kinetičku teoriju plina (MKTP), objavljen je u časopisu Physical Review Physics Education Research [1]. Sastoji se od ukupno 22 zadatka kojima se ispituju koncepti građe, volumena, tlaka, međumolekularne potencijalne energije, kinetičke energije molekula, temperature, molekularne brzine, unutarnje termalne energije i entropije plina. U nastavku ovog rada nalazi se kratak osvrt na neke od zadataka koji su reprezentativni u smislu otkrivanja pogrešnih ideja o navedenim konceptima.

KONCEPT GRAĐE PLINA

U četirima zadacima testa MKTP [1] ispitivali smo konceptualno razumijevanje građe realnog plina (raspored, međudjelovanja i način gibanja molekula). Konkretno, ispitivali smo poznavanje razlike između realnog i idealnog plina, poznavanje koncepta Brownovog gibanja molekule u plinu, te razumijevanje koncepta raspodjele molekula plina po brzinama.

Jedan od tih zadataka koji je vezan uz koncept građe plina prikazan je na slici 1 u skraćenom obliku. Odgovor C prikazuje ispravnu putanju molekule plina uslijed njenog termičkog gibanja u posudi, pri čemu se molekula sudara sa stijenka posude te s ostalim molekulama plina. Međutim, najčešći odgovor u okviru provedenog istraživanja [1] bio je A, u kojemu se pogrešno tvrdi da se molekule plina ne sudaraju međusobno već samo sa stijenka posude. Ovakav način razmišljanja prema kojemu se čestice idealnog plina međusobno ne sudaraju zbog zanemarivih volumena, potječe iz vremena prije 20. st. kada nije bilo izravnih eksperimentalnih rezultata o veličini molekula, a pristaše tadašnje kinetičke teorije polazili su od pretpostavke da su čestice plina „beskonačno male“. Budući da se molekule svedene na točku ne mogu sudarati, a kinetički model plina pretpostavlja sudare, postoje pokušaji popravljavanja modela idealnog plina na način da se molekule plina smatraju malim kuglicama konačnog volumena [9]. Bez obzira na to, u

2. Koja od danih skica najbolje prikazuje putanju molekule plina uslijed njenog termičkog gibanja u posudi prikazanoj kvadratnim okvirom? U posudi se nalazi plin.

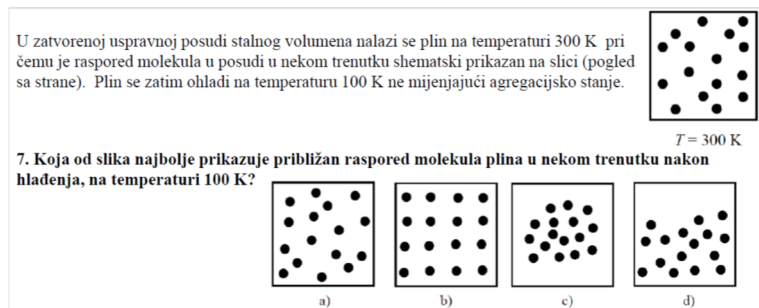


SLIKA 1. Zadatak iz konceptualnog testa MKTP [1] vezan uz koncept građe plina (u skraćenom obliku).

mnogim udžbenicima se i dalje navodi prvobitna pretpostavka [10], što očito uzrokuje poteškoće u konceptualnom razumijevanju i dovodi u pitanje sam model idealnog plina [1].

KONCEPT VOLUMENA PLINA

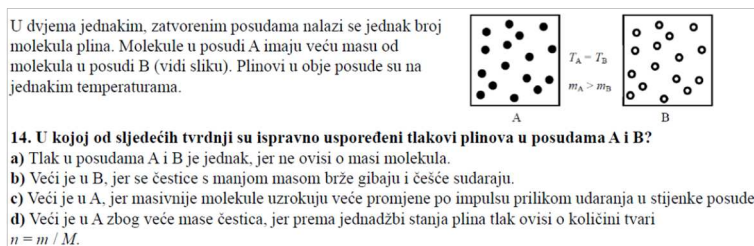
Zadatkom prikazanim na slici 2 ispitivali smo predviđanja o promjeni volumena plina s promjenom temperature. Polazeći od mikroskopskog modela plina, prema kojemu čestice plina međudjeluju vrlo slabim kratkodosežnim silama te se gibaju pravocrtno do sudara s drugim česticama plina ili sa stijenkama posude, slijedi da je volumen plina, bez obzira na njegovu temperaturu, približno jednak volumenu posude u kojoj se nalazi (odgovor A). Najčešći je bio pogrešan odgovor C. Ispitanici koji su u okviru intervjua dali odgovor C, smatrali su da se čestice s manjom kinetičkom energijom gibaju sporije te zauzimaju manje prostora. Pritom su pogrešno precjenjivali međusobnu interakciju čestica, što je u skladu s rezultatima istraživanja [10], poistovjećujući ponašanje čestica u krutom tijelu s ponašanjem čestica u plinu. Netočni zaključci o rasporedu čestica ohlađenog plina su se davali i na temelju nerelevantnih opažanja, npr. kontrakcije balona koji se hladi.



SLIKA 2. Zadatak iz konceptualnog testa MKTP [1] vezan uz koncept volumena plina (u skraćenom obliku).

KONCEPT TLAKA PLINA

Kvalitativno razumijevanje tlaka plina ispitivali smo zadatkom prikazanim na slici 3. Točan odgovor A glasi da tlak plina ne ovisi o masi molekula, već samo o njihovu broju te temperaturi i volumenu plina. Do njega se moglo doći pozivanjem na jednadžbu stanja idealnog plina u obliku $pV=NkT$. Međutim, ispitanici su najčešće odabirali pogrešan odgovor D, čime su pokazali da imaju pogrešan koncept tlaka plina te da koriste manjkava obrazloženja u vidu jednadžbi, nastojeći potkrijepiti svoje pogrešno uvjerenje, u skladu s rezultatima [5]. Konkretno, pogrešno su argumentirali ovisnost tlaka plina o masi molekula, pozivajući se na jednadžbu stanja idealnog



SLIKA 3. Zadatak iz konceptualnog testa MKTP [1] vezan uz koncept tlaka plina (u skraćenom obliku).

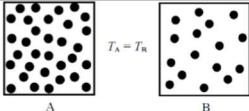
plina u obliku $pV=nRT$ iz koje je vidljivo da p ovisi o množini tvari, tj. o broju molova plina $n=m/M$. Pritom nisu vodili računa o kontroli varijabli, tj. koncentrirali su se na ovisnost dviju veličina (p i m), potpuno ignorirajući treću (M), što je također u skladu s rezultatima prethodnih istraživanja [5, 11, 12].

KONCEPT MEĐUMOLEKULARNE POTENCIJALNE ENERGIJE PLINA

Za razliku od idealnog plina, u realnom plinu se prilikom razmatranja unutarnje termalne energije uzima u obzir, osim kinetičke, i međumolekularna potencijalna energija koja je posljedica djelovanja međumolekularnih sila. Budući da prema našim saznanjima nisu prethodno postojala edukacijska istraživanja o razumijevanju ovog koncepta, njemu smo u testu MKTP [1] posvetili najveću pozornost uključivši ga eksplicitno u 4 zadatka te implicitno u dodatna 4 zadatka. Ispitivali smo razumijevanje ovisnosti međumolekularne potencijalne energije o udaljenosti među molekulama plina, o promjeni temperature plina te o broju molekula plina.

Primjerice, u zadatku prikazanom na slici 4 točan odgovor C glasi da je prosječna potencijalna energija molekula veća u posudi u kojoj je prosječna udaljenost među susjednim molekulama veća. Međutim, najzastupljeniji je bio pogrešan odgovor D, koji sadrži tvrdnju o međumolekularnoj potencijalnoj energiji zbog navodnog zadovoljenja uvjeta jednake unutarnje energije, u skladu s rezultatima istraživanja [13]. Očito je da su studenti miješali unutarnju energiju, koja je jednaka zbroju kinetičke i potencijalne energije molekula, s ukupnom mehaničkom energijom, koja je jednaka zbroju kinetičke i potencijalne energije tijela, poistovjećujući međumolekularnu potencijalnu energiju s gravitacijskom. Na taj način, oni su pogrešno nastojali primijeniti zakon očuvanja mehaničke energije, zanemarujući činjenicu da se o očuvanju energije u termodinamici može govoriti u sklopu 1. zakona termodinamike. To zahtijeva istraživanje interakcije sustava s okolinom, na temelju čega se može zaključivati o prijenosu topline, obavljenom radu i promjeni unutarnje energije, što studentima predstavlja velike poteškoće [14]. Pretpostavljamo da su te poteškoće mogući razlog zbog kojeg studenti pribjegavaju „jednostavnijim i već poznatim“ pogrešnim argumentima.

U dvjema jednakim zatvorenim posudama A i B na slici, na jednakoj temperaturi, nalazi se različit broj molekula istog plina.



11. U kojoj od sljedećih tvrdnji su ispravno uspoređene prosječne potencijalne energije molekule u posudama A i B?

- Veća je u A, jer mora biti zadovoljen uvjet jednake unutarnje energije.
- Veća je u A zbog manje prosječne udaljenosti među molekulama.
- Veća je u B zbog veće prosječne udaljenosti među molekulama.
- Veća je u B, jer mora biti zadovoljen uvjet jednake unutarnje energije.

SLIKA 4. Zadatak iz konceptualnog testa MKTP [1] vezan uz koncept međumolekularne potencijalne energije plina (u skraćenom obliku).

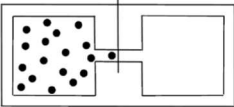
KONCEPTI KINETIČKE ENERGIJE I SREDNJE BRZINE MOLEKULA TE TEMPERATURE PLINA

Pitanje o srednjoj kinetičkoj energiji po molekuli plina eksplicitno smo postavili u trima zadacima unutar MKTP testa [1]. Ispitivali smo njenu ovisnost o temperaturi, promjenu prilikom dovođenja topline, te promjenu nakon povećanja volumena posude. Pitanja o unutarnjoj termalnoj energiji i temperaturi plina, također uključuju razmatranja srednje kinetičke energije po molekuli plina, odnosno ukupne kinetičke energije molekula plina u različitim situacijama. Nastojeći ispitati u kojoj mjeri studenti razumiju povezanost temperature plina i srednje kinetičke energije molekule plina, u dvama zadacima smo pitali što se događa s temperaturom plina tijekom adijabatske kompresije plina, odnosno nakon dovođenja topline. Razumijevanje koncepta srednje brzine po molekuli plina ispitali smo zadatkom u kojemu se razmatrala ovisnost brzine o masi molekula na zadanoj temperaturi.

Primjerice, zadatak prikazan na slici 5, osim što otkriva odgovarajuće studentske miskonceptije, ilustrira činjenicu da molekularno-kinetička teorija modela idealnog plina nije

odgovarajuća za realne plinove i kao takva nije preporučljiva za usvajanje termodinamičkih koncepata [15]. Naime, uzimajući u obzir model idealnog plina, otvaranjem ventila se molekulama plina energija ne dodaje niti oduzima. Stoga se ne mijenja unutarnja termalna energija, pa tako ni srednja kinetička energija molekula plina (budući da se zanemaruje međumolekularna potencijalna energija), kao ni temperatura plina. Ovakav zaključak, sadržan u najzastupljenijem distraktoru A koji se pogrešno argumentira termičkom izolacijom sustava, u suprotnosti je s iskustvom koje nam govori da se plin širenjem hladi. Stoga nije neobično što je idući po zastupljenosti pogrešan odgovor B. U okviru tog distraktora, studenti se pogrešno pozivaju na rjeđe sudaranje među česticama, te na taj način nastoje argumentirati smanjenje temperature koje je u skladu s iskustvom. Ispravan odgovor moguće je dati jedino uz pomoć modela realnog plina. Otvaranjem ventila temperatura će se smanjiti, kao i kinetička energija molekula, jer će se međumolekularna energija povećati, dok će unutarnja termalna energija ostati nepromijenjena (odgovor C).

22. Termički izolirana posuda sastoji se od dva dijela međusobno spojena uskom cjevčicom (vidi sliku). Dok je ventil zatvoren, plin ispunjava lijevi dio posude, a u desnom dijelu je vakuum.



Što će se dogoditi sa srednjom kinetičkom energijom molekule plina nakon otvaranja ventila?

- Ostat će jednaka kao i temperatura, jer je sustav termički izoliran
- Smanjit će se, jer će se udaljenost među česticama povećati te će se one rjeđe sudarati.
- Smanjit će se, jer će se prosječna potencijalna energija povećati, a unutarnja energija će ostati nepromijenjena.
- Ostat će jednaka, poput unutarnje energije plina i potencijalne energije čestica plina, jer se plin zadržava u istom dijelu posude nakon otvaranja ventila.

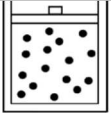
SLIKA 5. Zadatak iz konceptualnog testa MKTP [1] vezan uz koncept kinetičke energije molekula plina (u skraćenom obliku).

KONCEPT UNUTARNJE TERMALNE ENERGIJE PLINA

Konceptu unutarnje termalne energije plina posvetili smo posebnu pažnju jer na poteškoće vezane uz ovaj koncept ukazuju mnogi rezultati edukacijskih istraživanja, primjerice [2, 14], kao i naša osobna iskustva tijekom predavanja na različitim razinama obrazovanja (od osnovnoškolskog do visokoškolskog) te na radionicama s nastavnicima iz osnovnih i srednjih škola. U četirima zadacima MKTP testa [1] eksplicitno su postavljena pitanja o termalnoj energiji. Studenti su trebali odgovoriti što će se dogoditi s termalnom energijom tijekom hlađenja plina, odnosno tijekom adijabatske kompresije plina, te su trebali usporediti termalne energije s obzirom na broj molekula, odnosno masu molekula na odgovarajućoj temperaturi.

Primjerice, u zadatku prikazanom na slici 6 se u okviru točnog odgovora A tvrdi da se tijekom spuštanja klipa, unutarnja termalna energija povećava zbog povećanja kinetičke energije molekula, jer se međumolekularna potencijalna energija neznatno mijenja. Najčešći pogrešan odgovor je bio D, u kojemu se tvrdi da termalna energija ostaje jednaka jer se ne mijenjaju ni temperatura ni kinetička energija. Pritom se očituju poteškoće u razumijevanju pojma termičke izolacije, te u razumijevanju 1. zakona termodinamike.

U termički izoliranom cilindru nalazi se plin. S gornje strane cilindar je zatvoren klipom koji može kliziti bez trenja. Razmotrimo situaciju prilikom sporog pomicanja klipa u niži položaj (vidi sliku).



17. Što se događa s unutarnjom energijom plina tijekom spuštanja klipa?

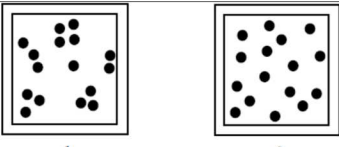
- Povećava se, jer se kinetička energija molekula povećava, a njihova potencijalna energija se neznatno mijenja.
- Povećava se, jer se povećavaju kinetička i potencijalna energija molekula.
- Povećava se, zbog povećanja topline.
- Ostaje jednaka, jer se ne mijenja temperatura, odnosno kinetička energija.

SLIKA 6. Zadatak iz konceptualnog testa MKTP [1] vezan uz koncept unutarnje termalne energije plina (u skraćenom obliku).

KONCEPT ENTROPIJE PLINA

Kvalitativno razumijevanje entropije, u smislu broja mikrostanja koja odgovaraju danom termodinamičkom stanju, ispitivali smo dvama zadacima MKTP testa [1]. Kvalitativnim rječnikom [16], entropija makrostanja to je veća, što je veći broj dopuštenih mikrostanja, odnosno što je veći broj načina na koji dotični makroskopski sustav može biti mikroskopski različit. Također, o entropiji ne možemo govoriti u trenutku, nego u dovoljno dugom vremenskom intervalu potrebnom za uspostavu ravnotežnog stanja. U situaciji opisanoj u zadatku na slici 7, spremnik je termički izoliran i zatvoren, na sobnoj temperaturi, što znači da je uspostavljeno ravnotežno stanje. Stoga se entropija ne mijenja tijekom vremena (prema klasičnoj Clausius-ovoj interpretaciji entropije), tj. jednaka je u trenucima 1 i 2 (odgovor C). Najzastupljeniji odgovor A [1] u kojemu se entropija spominje u kontekstu „nereda“ ili „slobode“ nije adekvatan, što potvrđuju primjeri iz statističke mehanike, poput rešetkastog modela plina [16]. Uz pomoć rešetkastog modela plina pokazuje se da su konfiguracije koje imaju nakupine čestica, odnosno šupljine (poput mikrostanja u trenutku 1), tipične za makrostanja s većom entropijom, što je potpuno suprotno ljudskoj intuiciji.

20. Slika prikazuje konfiguraciju molekula modela plina u termički izoliranom, zatvorenom sustavu na sobnoj temperaturi u dva različita trenutka 1 i 2.



Koja od sljedećih tvrdnji o entropiji vrijedi za stanja u trenucima 1 i 2?

a) Entropija je veća u trenutku 2, jer je sustav tada manje uređen.
 b) Entropija je veća u trenutku 2, jer se s vremenom povećava.
 c) Entropija je jednaka u trenucima 1 i 2.
 d) Ne možemo govoriti o entropiji u trenutku, nego u dovoljno dugom vremenskom intervalu.

SLIKA 7. Zadatak iz konceptualnog testa MKTP [1] vezan uz koncept entropije plina (u skraćenom obliku).

ZAKLJUČAK

Miskonceptije vezane uz molekularno-kinetičku teoriju plina proizašle iz zadataka o kojima se diskutira u ovom radu glase:

- Molekule plina se međusobno ne sudaraju.
- Čestice plina s manjom kinetičkom energijom zauzimaju manji volumen.
- Molekule veće mase stvaraju veći tlak pri stalnoj temperaturi.
- Međumolekularna potencijalna energija u plinu jednaka je gravitacijskoj energiji tijela.
- Sudaranje čestica plina proizvodi temperaturu, toplinu ili kinetičku energiju čestica.
- Plin se prilikom širenja ne hladi.
- Termički izoliranom plinu ne može se promijeniti temperatura.
- Unutarnja energija jednaka je toplini, temperaturi ili pak mehaničkoj energiji.
- Entropija je posljedica nepravilnog rasporeda molekula.

S ciljem kreiranja učinkovite nastave fizike vezane uz sadržaje termodinamike, smatramo da zadaci MKTP testa [1] te rezultati pripadnog istraživanja, mogu poslužiti kao polazišne točke za otkrivanje i ispravljanje odgovarajućeg konceptualnog okvira učenika i studenata, što predstavlja nužan preduvjet za izgradnju ispravnog fizičkog modela plina.

LITERATURA

1. N. Erceg, I. Aviani, V. Mešić, M. Glunčić and G. Žauhar, *Development of the kinetic molecular theory of gases concept inventory: Preliminary results on university students' misconceptions*, Phys. Rev. Phys. Educ. Res., **12**, 020139 (2016)
2. C. H. Kautz, P. R. L. Heron, P. S. Shaffer and L. C. McDermott, *Student understanding of the ideal gas law, part II: A microscopic perspective*, Am. J. Phys., **73**, 1064-1071 (2005)
3. R. Leinonen, E. Rasanen, M. Asikainen and P. E. Hirvonen, *Students pre-knowledge as a guideline in the teaching of introductory thermal physics at university*, Eur. J. Phys., **30**, 593-604 (2009)
4. S. Prelovšek-Peroš, B. Mikuličić, B. Milotić i I. Aviani, *Otkrivamo fiziku 7*, Školska knjiga, Zagreb, 2014., str. 117.
5. C. H. Kautz, P. R. L. Heron, M. E. Loverude and L. C. McDermott, *Student understanding of the ideal gas law, part I: A macroscopic perspective*, Am. J. Phys., **73**, 1055-1063 (2005)
6. J. Barbera and C. E. Wieman, *Effect of a Dynamic Learning Tutorial on Undergraduate students' Understanding of Heat and the First Law of Thermodynamics*, Chem. Educator, **14**, 45-48 (2009)
7. L. C. McDermott and P. S. Shaffer, *Tutorials in Introductory Physics*, Pearson, Boston, 2010.
8. M. Prince, M. Vigeant and K. Nottis, *Development of the Heat and Energy Concept Inventory: Preliminary Results on the Prevalence and Persistence of Engineering Students' Misconceptions*, J. Eng. Educ., **101**, 412-438 (2012)
9. D. Halliday, R. Resnick and J. Walker, *Fundamentals of Physics*, Wiley, New York, 2005, pp. 641–642.
10. A. D. Robertson and P. S. Shaffer, *University student and K-12 teacher reasoning about the basic tenets of kinetic-molecular theory, part I: Volume of an ideal gas*, Am. J. Phys., **81**, 303-312 (2013)
11. S. Rozier and L. Viennot, *Students' reasonings in thermodynamics*, Int. J. Sci. Educ., **13**, 159-170 (1991)
12. R. Leinonen, M. A. Asikainen and P. E. Hirvonen, *University Students Explaining Adiabatic Compression of an Ideal Gas – A New Phenomenon in Introductory Thermal Physics*, Res. Sci. Educ., **42**, 1165-1182 (2012)
13. P. L. Thomas and R. W. Schwenz, *College physical chemistry students' conceptions of equilibrium and fundamental thermodynamics*, J. Res. Sci. Teach., **35**, 1151-1160 (1998)
14. M. E. Loverude, C. H. Kautz and P. R. L. Heron, *Student understanding of the first law of thermodynamics: Relating work to the adiabatic compression of an ideal gas*, Am. J. Phys., **70**, 137-148 (2002)
15. M. K. Summers, *Teaching heat — An analysis of misconceptions*, Sch. Sci. Rev., **64**, 670-676 (1983)
16. D. F. Styer, *Insight into entropy*, Am. J. Phys., **68**, 1090-1096 (2000)