

Jakov Labor

FIZIKA 2

UDŽBENIK ZA **DRUGI RAZRED SREDNJIH ŠKOLA**
S TROGODIŠNJIM PROGRAMOM FIZIKE



5. izdanje
Zagreb, 2024.

Nakladnik
Alfa d.d.
Zagreb, Nova Ves 23a

Za nakladnika
Ivan Petric

Urednik
dr. sc. Dragan Roša

Recenzenti
prof. dr. sc. Ivica Orlić
Stjepan Knežević, prof. savjetnik

Likovna urednica
Irena Lenard

Likovno i grafičko oblikovanje
Darija Vuković

Lektorica i korektorica
Kristina Ferenčina

Nijedan dio ove knjige ne smije se umnožavati,
fotokopirati ni na bilo koji način reproducirati
bez nakladnikova pismenog dopuštenja.

Udžbenik je uvršten u Katalog odobrenih udžbenika
rješenjem Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske:
KLASA: UP/I-602-09/14-01/00029
URBROJ: 533-26-14-0002, od 15. svibnja 2014.

CIP zapis dostupan u računalnome katalogu Nacionalne
i sveučilišne knjižnice u Zagrebu pod brojem 001214296.

Tisak
Denona

Jakov Labor

FIZIKA 2

UDŽBENIK ZA **DRUGI RAZRED SREDNJIH ŠKOLA**
S TROGODIŠNJIM PROGRAMOM FIZIKE

Sadržaj

RAD I ENERGIJA U TOPLINSKIM SUSTAVIMA

Temperatura, unutarnja energija i toplina.....	8
<i>Toplinsko rastezanje čvrstih tijela i tekućina.....</i>	<i>12</i>
<i>Izobarna i izohorna promjena stanja plina.....</i>	<i>16</i>
<i>Izotermna promjena stanja plina i jednadžba stanja plina.....</i>	<i>21</i>
Toplinski kapacitet.....	25
<i>Promjene agregacijskih stanja.....</i>	<i>28</i>
Prvi zakon termodinamike.....	32
Toplinski stroj.....	36
Drugi zakon termodinamike.....	39

RAD I ENERGIJA U ELEKTROMAGNETSKIM SUSTAVIMA

Električni potencijal i napon.....	42
Kapacitet i kondenzator.....	46
Spajanje kondenzatora.....	49
<i>Energija električnog polja.....</i>	<i>52</i>

ELEKTRODINAMIKA

Gibanje naboja u električnom polju.....	56
Električna struja.....	59
Ohmov zakon.....	62
Električni otpor.....	64
Rad i snaga električne struje.....	67
Strujni krug.....	69
Spajanje otpornika.....	73
Električni mjerni instrumenti.....	77
Magnetska sila na vodič kojim teče struja.....	80
Magnetska sila na nabijenu česticu.....	83
Magnetsko polje električne struje.....	87
Djelovanje struje na struju.....	90
Elektromagnetska indukcija.....	92
Međuindukcija i samoindukcija.....	97
<i>Energija magnetskog polja.....</i>	<i>100</i>
Izmjenična struja.....	102
<i>Reaktivni otpori.....</i>	<i>106</i>
<i>Serijski spoj otpornika, zavojnice i kondenzatora.....</i>	<i>110</i>
<i>Transformator.....</i>	<i>114</i>
<i>Rješenja zadataka.....</i>	<i>116</i>
<i>Kazalo.....</i>	<i>119</i>

Predgovor

Ovaj je udžbenik napisan prema nastavnom programu fizike za srednje škole u kojima se fizika uči tri godine. Programom je predviđena obrada sljedećih nastavnih cjelina:

1. Rad i energija u toplinskim sustavima
2. Rad i energija u elektromagnetskim sustavima
3. Elektrodinamika.

Tijela se sastoje od čestica (atoma, molekula) koje se nasumično gibaju i uzajamno djeluju privlačnim i odbojnim silama. Zbog gibanja, čestice imaju kinetičku energiju, a zbog privlačnih i odbojnih sila imaju i potencijalnu energiju. Ukupnu kinetičku energiju nasumičnog gibanja čestica tijela i ukupnu potencijalnu energiju njihova međudjelovanja nazivamo **unutarnjom energijom** tijela. U dodiru dvaju tijela različitih temperatura unutarnja energija prelazi s tijela veće temperature na tijelo manje temperature. Taj dio unutarnje energije koji prelazi s tijela veće temperature na tijelo manje temperature nazivamo **toplina**. Sustave u kojima dolazi do izmjene topline možemo nazvati **toplinskim sustavima**. Osim izmjenom topline, unutarnja se energija tijela može promijeniti i **radom**. U određenim uvjetima tijelo može obavljati rad zahvaljujući toplini primljenoj od drugog tijela. Dio fizike koji, između ostaloga, istražuje pretvorbu topline u rad naziva se **termodinamika**.

Električki nabijene čestice uzajamno djeluju električnim silama koje mogu biti odbojne i privlačne. Čestice zbog toga imaju električnu potencijalnu energiju. Ako se gibaju, čestice imaju i kinetičku energiju. Kinetička i potencijalna energija električki nabijenih čestica čine **električnu energiju**. Ona se, kao i drugi oblici energije, može mijenjati radom.

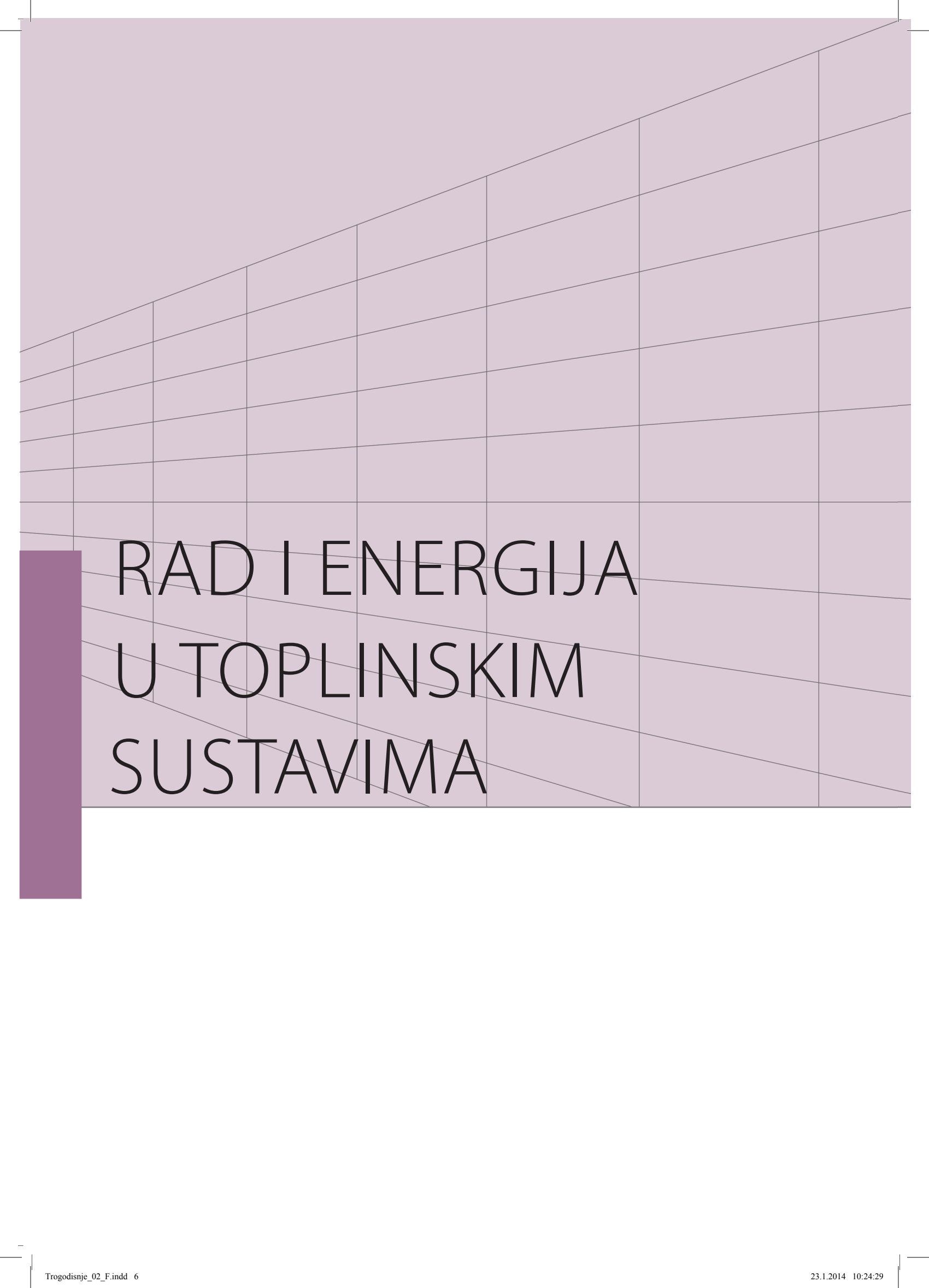
Elektrodinamika je grana fizike koja istražuje gibanje električki nabijenih čestica i njihovo uzajamno djelovanje. Na gibanje električki nabijenih čestica utječu električno i magnetsko polje. Od posebnog je značaja usmjereno gibanje nabijenih čestica, koje nazivamo električnom strujom.

Nastavno je gradivo u udžbeniku raščlanjeno na nastavne jedinice i sažeto izloženo na učenicima pristupačan način. Prošireni i izborni sadržaji tiskani su *kosim slovima*.

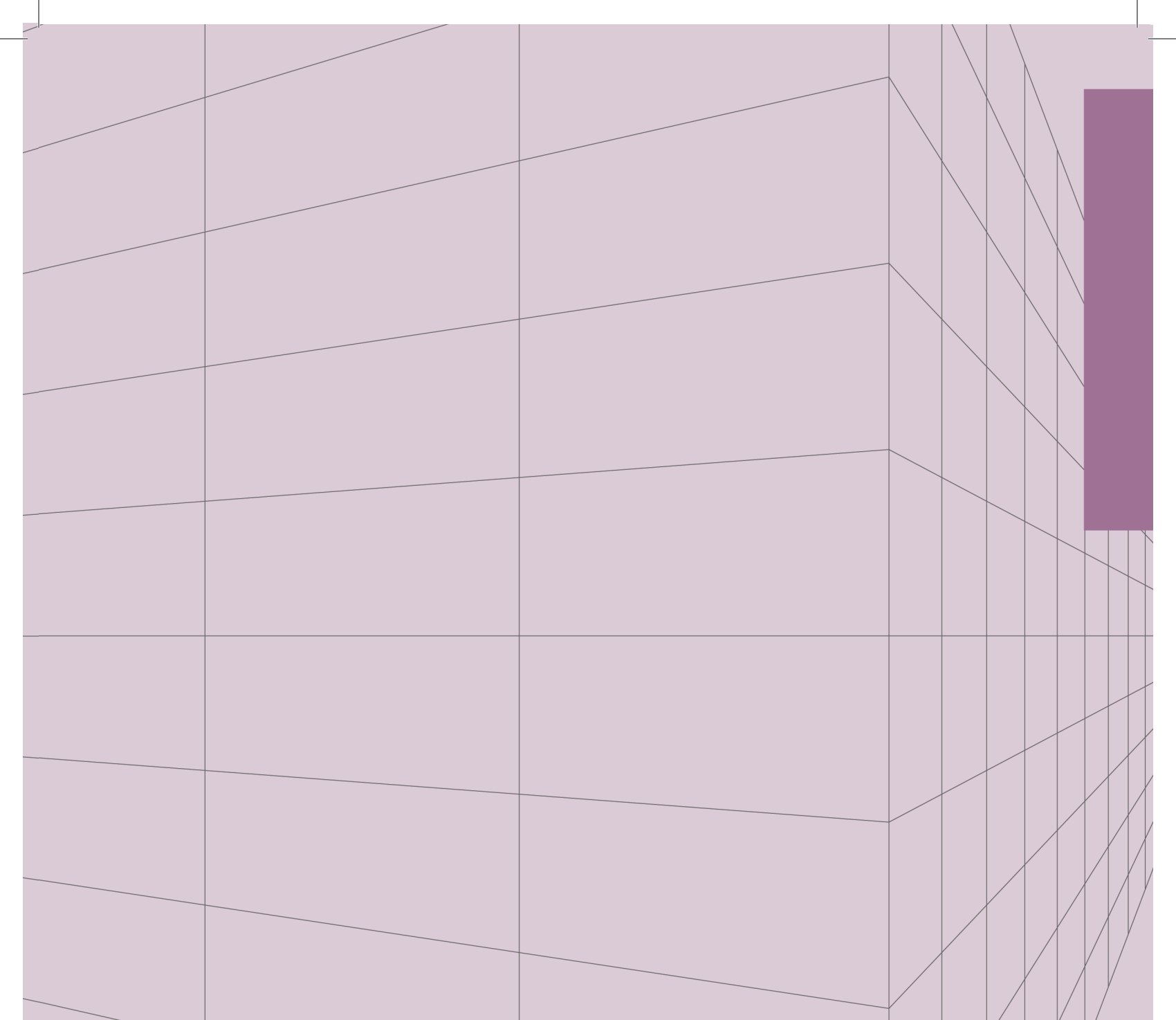
Unutar nastavnih jedinica nalaze se i riješeni primjeri te pitanja i zadaci iz izloženoga gradiva. Zamišljeno je da učenicima posluže kao domaća zadaća koju nastavnik pregledava na početku nastavnog sata. Odgovarajući samostalno na ponuđena pitanja učenici mogu provjeriti koliko su obrađeno gradivo usvojili i razumjeli. Odgovori na pitanja nisu navedeni u udžbeniku, ali su sadržani u tekstu pa time potiču učenike na pažljivije čitanje udžbenika. Rjeđa su pitanja koja zahtijevaju malo višu razinu znanja i u tekstu nemaju izravnog odgovora. Imaju li poteškoća s takvim pitanjima, učenici mogu zatražiti pomoć nastavnika.

Na kraju udžbenika nalaze se rješenja zadataka kako bi učenici mogli provjeriti ispravnost vlastitih rješenja.

Autor



RAD I ENERGIJA U TOPLINSKIM SUSTAVIMA



Temperatura, unutarnja energija i toplina	8
<i>Toplinsko rastezanje čvrstih tijela i tekućina</i>	12
<i>Izobarna i izohorna promjena stanja plina</i>	16
<i>Izotermna promjena stanja plina i jednadžba stanja plina</i>	21
Toplinski kapacitet	25
<i>Promjene agregacijskih stanja</i>	28
Prvi zakon termodinamike	32
Toplinski stroj	36
Drugi zakon termodinamike	39

Temperatura, unutarnja energija i toplina

Temperatura. Temperatura je fizička veličina koja je povezana s našim osjetom za toplo i hladno. Toplije tijelo ima veću temperaturu od hladnijeg. U toplijem je tijelu gibanje čestica tvari (atoma, molekula) intenzivnije nego u hladnijem. To zapravo znači da je temperatura tijela veća što je veća kinetička energija njegovih čestica. Temperatura je razmjerna srednjoj kinetičkoj energiji čestica tvari.

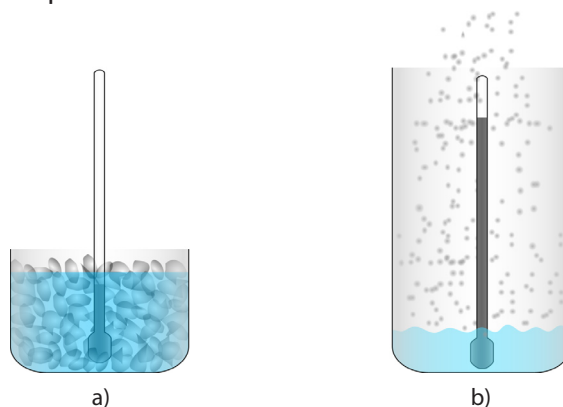
Jedinica za temperaturu u Međunarodnom sustavu jedinica (SI) jest kelvin (K). U svakodnevnom životu obično se služimo Celzijevim stupnjevima (°C). Iznos temperature u kelvinima dobijemo tako da iznosu temperature u Celzijevim stupnjevima dodamo 273,15:

$$\frac{T}{\text{K}} = \frac{t}{^{\circ}\text{C}} + 273,15$$

Temperaturu mjerimo **termometrom**. Njegov se rad temelji na promjeni određenih svojstava tijela pri zagrijavanju ili hlađenju, tj. kada im se temperatura mijenja. S promjenom temperature mijenjaju se, na primjer, dimenzije čvrstih tijela, obujam tekućina, električni otpor itd. Opisat ćemo načelno kako se izrađuje živin termometar kojim temperaturu mjerimo na temelju promjene obujma žive.

Na posudicu sa živom nastavlja se vrlo uska cijev (kapilara) u kojoj je vakuum i koja je na gornjem kraju zataljena. Stavimo posudicu s kapilaram u posudu sa stucanim ledom (slika 1.1.a). Dogovorom je uzeto da temperatura leda koji se tali pri normiranom tlaku (101 325 Pa) iznosi 0 °C pa tu vrijednost temperature pridružujemo stupcu žive u kapilari. Kada posudicu s kapilaram stavimo u kipuću vodu (slika 1.1.b), obujam žive će se povećati. To se očituje produljenjem njezina stupca u kapilari. Ako je voda na normiranom tlaku, toj duljini stupca žive pridružujemo temperaturu 100 °C. Duljinu stupca koja odgovara jednom stupnju dobijemo tako da duljinu između 0 °C i 100 °C podijelimo na sto jednakih dijelova. Ljestvica se može proširiti ispod 0 °C i iznad 100 °C.

U nekim se državama rabi temperaturna ljestvica s Fahrenheitovim stupnjevima (°F). Na toj je ljestvici ledište vode pri 32 °F, a vrelište pri 212 °F.



Slika 1.1. Temperatura stucanog leda koji se tali iznosi 0 °C (a), a kipuće vode 100 °C (b)

Unutarnja energija i toplina. Pod **unutarnjom energijom** (U) sustava podrazumijevamo ukupnu kinetičku energiju termičkoga gibanja čestica tog sustava i ukupnu potencijalnu energiju njihova međudjelovanja. Kinetička energija termičkoga gibanja čestica veća je pri većim temperaturama pa je pri većim temperaturama veća i unutarnja energija sustava.

Stavimo li u dodir dva tijela (sustava čestica) različitih temperatura, iz iskustva znamo da će hladnijem tijelu temperatura rasti, a toplijem padati sve dok tijela ne postignu jednaku temperaturu. Ako su se tijelima promijenile temperature, promijenile su im se i unutarnje energije. Toplijem se tijelu unutarnja energija smanjila, a hladnijem povećala. Toplije tijelo predalo je dio vlastite unutarnje energije hladnijem tijelu. Dio unutarnje energije tijela (sustava) koji prelazi na drugo tijelo (sustav) zbog temperaturne razlike nazivamo **toplina** (Q).

RAD I ENERGIJA U TOPLINSKIM SUSTAVIMA

Prijenos topline. Toplina se iz područja veće temperature u područje manje temperature može prenositi na tri načina: vođenjem ili kondukcijom, strujanjem ili konvekcijom i elektromagnetskim zračenjem ili radijacijom.

Uхватimo li rukom za kraj metalnog štapa, a drugi kraj stavimo u plamen, ubrzo ćemo osjetiti da se temperatura kraja štapa kojega držimo u ruci povećava. Na kraju štapa koji je u plamenu srednja je kinetička energija gibanja čestica veća nego u ostalim dijelovima štapa. Međudjelovanjem susjednih čestica energija se prenosi od čestice do čestice na ostale dijelove štapa, sve do njegova drugoga kraja. Ovaj način prenošenja topline nazivamo **vođenje** ili **kondukcija**. Vođenje topline bolje je u čvrstim tijelima nego u fluidima, a osobito je dobro u metalima kod kojih u vođenju topline sudjeluju i elektroni koji nisu čvrsto vezani za atome, tzv. slobodni elektroni. U plinovima je zbog velikih međučestičnih udaljenosti kondukcija najslabija.

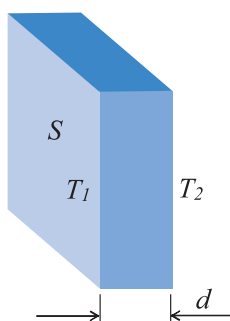
Na slici 1.2. prikazan je sloj sredstva kojim se prenosi toplina. Debljina je sloja d , a površina plohe kroz koju se okomito prenosi toplina S . Između ploha sloja postoji temperaturna razlika $\Delta T = T_2 - T_1$. Kvocijent količine topline (Q) i vremena (t) za koje se ona prenese kroz sloj sredstva nazivamo **toplinski tok** (q):

$$q = \frac{Q}{t},$$

a iskazujemo ga vatima (W). Pokus pokazuje da je toplinski tok razmjernan temperaturnoj razlici i površini plohe, a obrnuto razmjerna debljini sloja:

$$q = -\lambda S \frac{\Delta T}{d},$$

gdje je λ **koeficijent toplinske vodljivosti** sredstva. Ovo je **Fourierov zakon**. Negativan predznak pokazuje da je toplinski tok u smjeru smanjenja temperature.



Slika 1.2.
Prenošenje topline vođenjem

Tvar	$\frac{\lambda}{\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}}$	Tvar	$\frac{\lambda}{\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}}$
srebro	420	cigla	0,7
bakar	385	voda	0,6
željezo	60	drvo	0,13
beton	1,3	papir	0,13
staklo	0,8	staklena vuna	0,035
žbuka	0,8	zrak	0,025

Tablica 1.1. Koeficijent toplinske vodljivosti nekih tvari pri temperaturi 20 °C

Tvari s većim koeficijentom toplinske vodljivosti (srebro, bakar, željezo) dobri su vodiči topline, dok su one s malim koeficijentom toplinske vodljivosti (primjerice zrak) toplinski izolatori.

U fluidima temperaturna razlika može prouzročiti usmjereno gibanje čestica fluida, tj. strujanje. To se, primjerice, događa u prostoriji s radijatorom. Zrak uz radijator ima veću temperaturu i manju gustoću od okolnog zraka. Zbog manje gustoće taj se zrak podiže, a hladniji se spušta. Strujanjem od radijatora prema hladnijim dijelovima prostorije čestice toplog zraka prenose toplinu. Prenosjenje topline **strujanjem** naziva se i **konvekcija**.

Uočimo razliku između kondukcije i konvekcije. Pri kondukciji se čestice tvari gibaju oko svojih ravnotežnih položaja i stalno borave u istom dijelu sredstva, dok se pri konvekciji čestice sele tako da se u promatranom području izmjenjuju čestice veće i manje energije.

U fluidima se toplina prenosi istodobno kondukcijom i konvekcijom, pri čemu je kondukcija zanemariva prema konvekciji.

Strujanje se fluida, a time i prijenos topline može pomoću raznih uređaja pospješiti. Tada govorimo o prisilnom strujanju, a susrećemo ga u termoakumulacijskim pećima, sušilu za kosu, u sustavima centralnog grijanja i sličnim uređajima.

Toplinski tok pri konvekciji može se približno odrediti pomoću izraza:

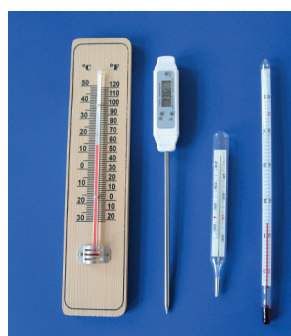
$$q = h_c S (T_p - T_f) ,$$

gdje je h_c koeficijent konvekcije, S površina plohe uz koju fluid struji, T_p temperatura plohe i T_f temperatura fluida prije dodira s plohom.

U najvećem dijelu prostora između Sunca i Zemlje gotovo da nema nikavih čestica, a ipak osjećamo da nas Sunce grije. Toplina se, dakle, može prenositi i prostorom bez čestica, tj. vakuumom. Taj se prijenos ostvaruje putem **elektromagnetskog zračenja** ili **radijacije**. Brzina je prenošenja jednaka brzini svjetlosti koja iznosi oko $3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$.



Toplina se zračenjem prenosi sa Sunca na Zemlju



Termometri

Pitanja:

1. Kako biste napravili termometar s temperaturnom ljestvicom u °C?
2. Koliko kelvina iznosi temperatura: a) 30°C, b) -15°C?
3. Što je unutarnja energija?
4. Što je toplina?
5. Dva jednaka tijela jednakih temperatura:
 - a) imaju jednake količine topline.
 - b) imaju jednake unutarnje energije.
 - c) nemaju jednake unutarnje energije.
6. Na koje se načine toplina prenosi:
 - a) sa štednjaka na vodu u zdjeli,
 - b) sa spiralne grijalice u okolni prostor?
7. Ako staklenu ploču na prozoru zamjenimo dvjema pločama između kojih se nalazi zrak, kako će se to odraziti na toplinsku izolaciju?

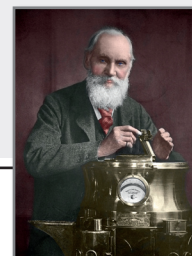
Zadatak:

1. Temperatura zraka s unutarnje strane betonskog kućnog zida iznosi 25 °C, a s vanjske strane 5 °C. Koliko se topline izgubi kroz zid za 12 sati ako je njegova površina 15 m², a debljine 30 cm? Za koliko bi se smanjili gubici topline kada bi zid bio od cigle?

Anders Celsius (1701. – 1744.) švedski je fizičar i astronom. Predložio je da se kao temperatura leđišta vode pri normiranom tlaku uzme 100°, a temperatura vrelišta 0°. Današnja temperaturna ljestvica na kojoj je leđište vode pri 0°, a vrelište pri 100° potječe od Linnea i Strömera.



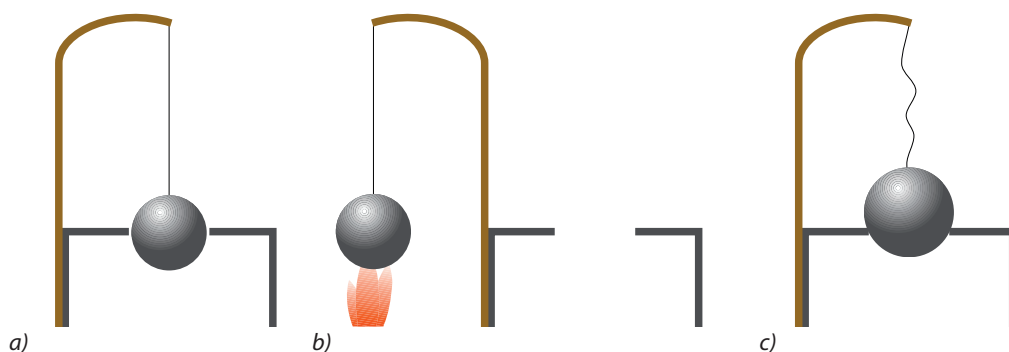
William Thomson, poznatiji kao lord Kelvin (1824. – 1907.) engleski je fizičar. Objavio je više od 300 znanstvenih radova, od kojih su najvažniji s područja termodinamike i elektriciteta. Predložio je apsolutnu temperaturnu ljestvicu koja je kasnije nazvana njegovim imenom.



Toplinsko rastezanje čvrstih tijela i tekućina

Pokus

Na slici 1.3.a prikazana je kugla koja pri sobnoj temperaturi upravo prolazi kružnim otvorom. Zagrijemo li kuglu na plamenu (slika 1.3.b), ona ne može proći istim otvorom (slika 1.3.c).



Slika 1.3.
Metalna se kugla zagrijavanjem širi

Pokus nam pokazuje da se zagrijavanjem (povećanjem temperature) obujam kugle povećao.

Zagrijavanjem tijela oblika štapa ili žice opažamo da je povećanje duljine tijela znatno veće od povećanja debljine. Povećanje debljine tada zanemarujemo i govorimo o **linearnom rastezanju**.

Linearno toplinsko rastezanje. Mjerenjem je utvrđeno da je promjena duljine pri linearnom rastezanju razmjerna početnoj duljini tijela i promjeni temperature. Obilježimo li s l_0 početnu duljinu tijela, a s Δt promjenu temperature, produljenje (Δl) je:

$$\Delta l = \beta l_0 \Delta t .$$

Veličinu β nazivamo **koeficijent linearnog rastezanja**. On pokazuje za koji se dio početne duljine promijeni duljina tijela pri promjeni temperature za 1 K (1 °C). Koeficijent β iskazujemo jedinicom K^{-1} ili $^{\circ}C^{-1}$.

Duljina tijela nakon zagrijavanja (l) zbroj je početne duljine i produljenja:

$$l = l_0 + \beta l_0 \Delta t,$$

odnosno:

$$l = l_0 (1 + \alpha \Delta t) .$$

Koeficijenti linearnog rastezanja različiti su za različite tvari, a općenito imaju malu vrijednost. Tako bi se, na primjer, bakrena žice duljine 1 m pri zagrijavanju za 1 K produljila tek za 17 tisućinki milimetra.

Koeficijent linearnog rastezanja ovisi i o temperaturi, no pri malim promjenama temperature (od 0 °C do 100 °C) možemo ga smatrati konstantnim.

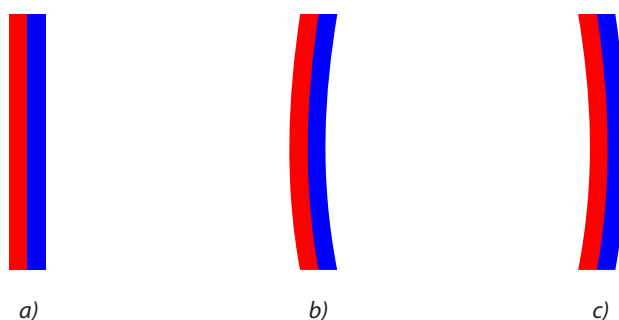
Neke se tvari (na primjer guma) stežu pri zagrijavanju, što znači da im je koeficijent linearnog rastezanja negativnog predznaka.

Tvar	$\beta / (10^{-6} \text{ K}^{-1})$	Tvar	$\beta / (10^{-6} \text{ K}^{-1})$
aluminij	24	platina	9
bakar	17	srebro	19
beton	10	staklo	oko 9
cink	30	zlato	14
mjed	20	željezo	12

Tablica 1.2. Koeficijent linearnog rastezanja (β) nekih tvari

Bimetal. Činjenicu da se različite tvari različito rastežu pri istoj promjeni temperature primjenjujemo pri izradi bimetalne vrpce. Nju čine dvije međusobno spojene vrpce od različitih metala. Pri određenoj je temperaturi bimetalna vrpca ravna (slika 1.4.a). Zagrijavanjem se savija na onu stranu na kojoj je metal manjeg koeficijenta linearnoga rastezanja (slika 1.3.b), a pri hlađenju obratno (slika 1.4.c).

Bimetalna vrpca u nekim kućanskim aparatima (bojler, grijalica, glačalo itd.) služi za održavanje stalne temperature (termostat). Zagrijavanje se u tim aparatima postiže električnom strujom. Kada temperatura prijeđe određenu vrijednost, bimetalna se vrpca toliko savije da se prekine električni kontakt i zagrijavanje prestane. Kada se temperatura snizi, bimetalna se vrpca vrati u položaj u kojem zatvara električni kontakt pa struja opet teče.



Slika 1.4. Savijanje bimetalne vrpce (a) pri zagrijavanju (b) i hlađenju (c)

Primjer:

Duljina željezne šipke pri temperaturi od $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ iznosi 30,00 m. Kolika joj je duljina pri $40 \text{ }^\circ\text{C}$?

Rješenje:

$$t_1 = -20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$l_1 = 30,00 \text{ m}$$

$$t_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\beta = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

$$l_2 = ?$$

$$l_1 = l_0(1 + \beta t_1) \Rightarrow l_0 = \frac{l_1}{1 + \beta t_1} \quad l_2 = \frac{l_1(1 + \beta t_2)}{1 + \beta t_1} = \frac{30,00 \text{ m} \cdot (1 + 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot 40 \text{ }^\circ\text{C})}{1 + 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot (-20 \text{ }^\circ\text{C})}$$

$$l_2 = l_0(1 + \beta t_2)$$

$$l_2 = 30,022 \text{ m.}$$

Volumno toplinsko rastezanje. Promjena obujma tijela s temperaturom obuhvaća promjenu svih njegovih dimenzija. Zakonitost do koje smo došli istražujući linearno rastezanje vrijedi za svaku dimenziju. Primijenimo tu zakonitost na tijelo oblika kocke.

Neka je početna duljina brida kocke l_0 . Tada je njezin početni obujam:

$$V_0 = l_0^3.$$

Nakon promjene temperature obujam je:

$$V = l^3 = (l_0(1 + \beta\Delta t))^3 = l_0^3(1 + 3\beta\Delta t + 3(\beta\Delta t)^2 + (\beta\Delta t)^3).$$

Treći i četvrti član u zagradi obično zanemarujemo zbog njihove male vrijednosti u odnosu na preostale. Konstantu 3β nazivamo **koeficijent volumnog rastezanja** i obilježavamo je slovom α :

$$3\beta = \alpha.$$

Konačno, izraz za obujam nakon promjene temperature glasi:

$$V = V_0(1 + \alpha\Delta t).$$

Tekućina	$\alpha / (10^{-3}\text{K}^{-1})$
živa	0,182
voda	0,2
petrolej	0,899
alkohol	oko 1

Tablica 1.3. Koeficijent volumnog rastezanja (α) nekih tekućina

Promjena gustoće s temperaturom. Gustoću tijela (ρ) definiramo kao kvocijent mase i obujma:

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

Kako se promjenom temperature obujam tijela mijenja, a masa ostaje ista, znači da se promjenom temperature mijenja i gustoća. Ako je početna gustoća:

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0},$$

onda je nakon promjene temperature:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{V_0(1 + \alpha\Delta t)}$$

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \alpha \Delta t}$$

Anomalija vode. Zagrijavamo li neku količinu vode i promatramo promjenu njezina obujma, vidjet ćemo da se obujam smanjuje pri porastu temperature od 0 °C do 4 °C, a daljnjim se zagrijavanjem povećava. Tu nepravilnost u promjeni obujma s temperaturom nazivamo **anomalijom vode**. Gustoća vode je najveća pri 4 °C. Zbog anomalije, voda se počinje lediti od površine. Naime, u dodiru sa zrakom površinska se voda hladi i postaje gušća te se spušta, a na površinu izlazi toplija voda. To traje sve dok se površinska voda ne ohladi na 4 °C. Hlađenjem površinske vode ispod 4 °C njezina gustoća postaje manja od gustoće toplije vode ispod nje. Zato voda s temperaturom nižom od 4 °C ostaje na površini gdje će se daljnjim hlađenjem i zalediti. Zaledivanje vode od površine prema dnu, a ne obratno, važno je za život flore i faune u rijekama, morima i jezerima.

Nepravilno toplinsko širenje nije svojstveno samo vodi, nego i mnogim drugim tekućinama.

Pitanja:

1. O čemu ovisi promjena duljine čvrstih tijela pri promjeni temperature?
2. Sprave za precizno mjerenje duljine izrađuju se od posebnog materijala. Kakav mora biti koeficijent linearnog rastezanja tog materijala: veliki ili mali?
3. Zašto se pri punjenju cisterni za prijevoz nafte dio cisterne ostavlja prazan?
4. Bimetalna je vrpca napravljena spajanjem željezne i bakrene vrpce. Na koju će se stranu (bakrenu ili željeznu) bimetalna vrpca savijati pri zagrijavanju?
5. U kakvom međusobnom odnosu moraju biti koeficijenti termičkog širenja betona i metala kojim se beton armira? Zašto?
6. Kako se promjena temperature odražava na gustoću tvari negativnoga koeficijenta rastezanja?
7. U kojem se temperaturnom području gustoća vode povećava s povećanjem temperature?

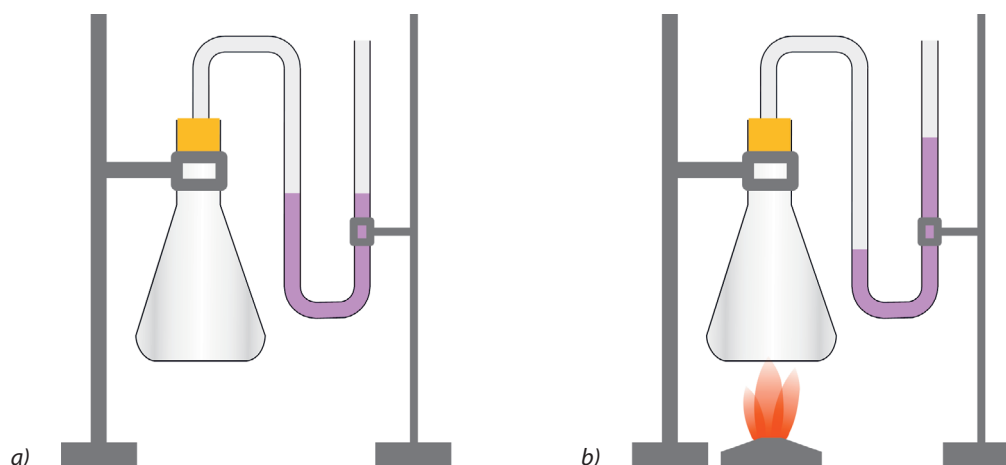
Zadaci:

1. Eiffelov je toranj pri temperaturi 0 °C visok 300 m. Koliko će se povećati visina tornja pri povećanju temperature na 28 °C?
2. Duljina štapa od platine iznosi 998 mm pri temperaturi 20 °C. Pri kojoj će temperaturi duljina štapa iznositi 1 m?
3. Pri temperaturi 0 °C na metalnom su štapu urezane dvije tanke crte. Razmak među crtama iznosio je 100,00 cm. Kada se štap zagrije do 100 °C, razmak između crta iznosi 100,18 cm. Koliki je koeficijent linearnog rastezanja metala od kojeg je štap napravljen?
4. Staklena posuda obujma 2 000 cm³ napunjena je alkoholom pri temperaturi 0 °C. Koliko će alkohola izaći iz posude kada se temperatura poveća na 50 °C? Koeficijent linearnog rastezanja stakla iznosi 0,9·10⁻⁵ K⁻¹, a koeficijent volumnog rastezanja alkohola 1,135·10⁻³ K⁻¹.
5. Duljina brida mjedene kocke pri 0 °C iznosi 3 cm. Pri kojoj će temperaturi obujam kocke iznositi 27,6 cm³?
6. Kolika je gustoća zlata pri temperaturi od 90 °C ako pri 20 °C iznosi 19,30 g cm⁻³?

Izobarna i izohorna promjena stanja plina

Pokus

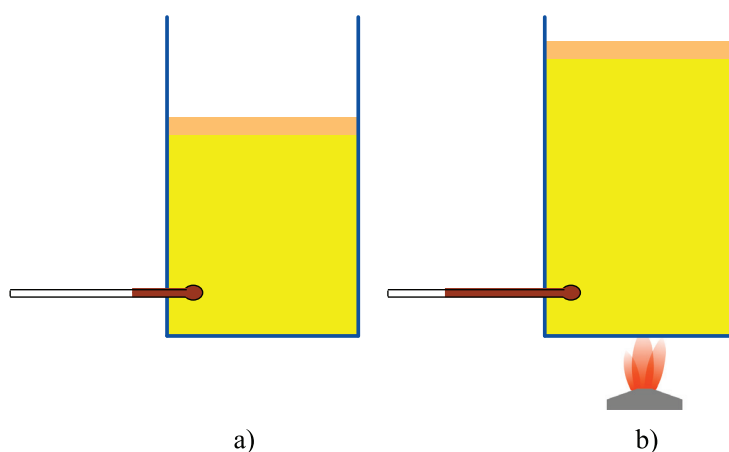
Na tikvicu spojimo U-cijev s obojenom vodom (slika 1.5.a). Zagrijavamo li plamenom zrak u tikvici, uočavamo da se razina vode u dijelu U-cijevi do tikvice spušta, a u drugom dijelu podiže (slika 1.5.b). To znači da se s porastom temperature povećava obujam zraka, ali i njegov tlak.



Slika 1.5.

Promjenom temperature mijenjaju se i tlak i obujam plina

Izobarna promjena stanja plina. Temperatura (T), tlak (p) i obujam (V) veličine su kojima opisujemo stanje plina. Želimo li istražiti kako se obujam plina mijenja s temperaturom, moramo tlak plina održavati stalnim. Promjenu stanja plina pri kojoj se uz stalan tlak mijenjaju temperatura i obujam nazivamo **izobarna** promjena stanja plina. Širenje plina pri stalnom tlaku moguće je, primjerice, ako se plin nalazi u posudi s klipom koji se može pomicati bez trenja (slika 1.6.a). Plin u posudi s pomičnim klipom može biti zrak, koji je zapravo smjesa plinova. Zagrijavanjem zrak se širi (slika 1.6.b), a tlak mu je pri svakoj temperaturi uravnotežen s atmosferskim tlakom i tlakom prouzročnim težinom klipa



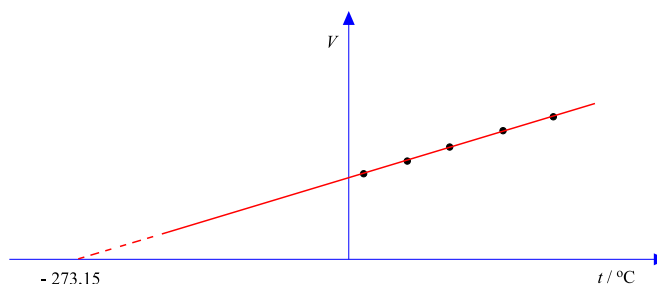
Slika 1.6.

Izobarno širenje plina

Kada bismo grafički prikazali ovisnost obujma zraka o temperaturi dobili bismo graf prikazan na slici 1.7. On sadrži stanja istoga tlaka i nazivamo ga **izobarom**.

Iz slike vidimo da je kvocijent promjene obujma i pripadajuće promjene temperature ($\Delta V/\Delta t$) stalan, tj. da je povećanje obujma plina pri stalnom tlaku razmjerno promjeni temperature:

$$\Delta V \sim \Delta t.$$



Slika 1.7.

Promjena obujma razmjerna je promjeni temperature

Povećanje obujma razmjerno je i početnoj vrijednosti obujma (V_0) te možemo pisati:

$$\Delta V = \alpha V_0 \Delta t,$$

gdje je α **toplinski koeficijent širenja plina**. Iz ove jednadžbe možemo odrediti toplinski koeficijent širenja plina (α). Mjerenja pokazuju da on za sve plinove iznosi $3,66 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ili $\frac{1}{273,15 \text{ K}}$

Obujam plina nakon promjene temperature za iznos Δt je jednak:

$$V = V_0(1 + \alpha \Delta t).$$

To je **Gay-Lussacov zakon**.

Uzmemo li da je početna temperatura 0°C , promjena je temperature jednaka konačnoj temperaturi pa je:

$$V = V_0(1 + \alpha t).$$

Povećanjem temperature plina povećava se njegov obujam, a gustoća mu se smanjuje. Zbog toga se topli zrak podiže, a hladni spušta, što je ključno za prenošenje topline konvekcijom.

Termodinamička ljestvica temperature. Smanjivanjem temperature plina uz stalan tlak obujam se plina smanjuje. Kada bi se temperatura plina snizila na $-273,15^\circ\text{C}$, njegov bi obujam prema Gay-Lussacovu zakonu bio jednak nuli (slika 1.7.). Na još manjim temperaturama obujam bi plina bio negativan. Budući da obujam plina ne može biti nula, a još manje može biti negativan, zaključujemo da je temperatura $-273,15^\circ\text{C}$ granična vrijednost malih temperatura. Odaberemo li temperaturnu ljestvicu na kojoj će ta temperatura biti nulta, sve će ostale temperature imati pozitivni predznak. Temperaturnu ljestvicu na kojoj nema negativnih temperatura nazivamo **apsolutnom, Kelvinovom ili termodinamičkom** temperaturnom ljestvicom. Najnižu temperaturu na toj ljestvici nazivamo apsolutnom nulom. Na termodinamičkoj temperaturnoj ljestvici ledište vode je pri $273,15 \text{ K}$ uz normirani tlak (slika 1.8.).



Slika 1.8.

Veza između Kelvinove i Celzijeve temperaturne ljestvice

Zaključak o nedostižnosti apsolutne nule izveli smo iz plinskog (Gay-Lussacova) zakona. Taj zakon ne vrijedi za niske temperature jer pri niskim temperaturama plin prelazi u tekuće stanje. Ipak, rezultati dosadašnjih pokusa potvrđuju ispravnost zaključka.

Uvrstimo li u izraz za Gay-Lussacov zakon $\alpha = \frac{1}{273,15 \text{ K}}$, dobivamo:

$$V = V_0 \left(1 + \frac{t}{273,15} \right) = V_0 \frac{273,15 + t}{273,15} = V_0 \frac{T}{T_0},$$

odnosno:

$$\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0},$$

gdje je za određenu količinu plina $T_0 = 273,15 \text{ K}$ ($0 \text{ }^\circ\text{C}$), V_0 obujam pri toj temperaturi, a V obujam pri nekoj drugoj temperaturi T .

Ovaj oblik Gay-Lussacova zakona kaže nam da je za određenu količinu plina kvocijent obujma plina i termodinamičke temperature stalan uz stalan tlak. To možemo zapisati i ovako:

$$\frac{V}{T} = \text{konst.}$$

Pridružimo li početnim vrijednostima temperature i obujma indeks 1, a konačnim vrijednostima tih veličina indeks 2, Gay-Lussacov zakon poprima oblik:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}.$$

Primjer:

Neka se količina plina nalazi na temperaturi od $27 \text{ }^\circ\text{C}$. Na koju temperaturu plin treba izobarno ohladiti da bi mu se obujam smanjio za 30%?

Rješenje:

$$t_1 = 27 \text{ }^\circ\text{C}, T_1 = 300 \text{ K}$$

$$V_2 = V_1 - 0,30 V_1 = 0,70 V_1$$

$$t_2 = ?$$

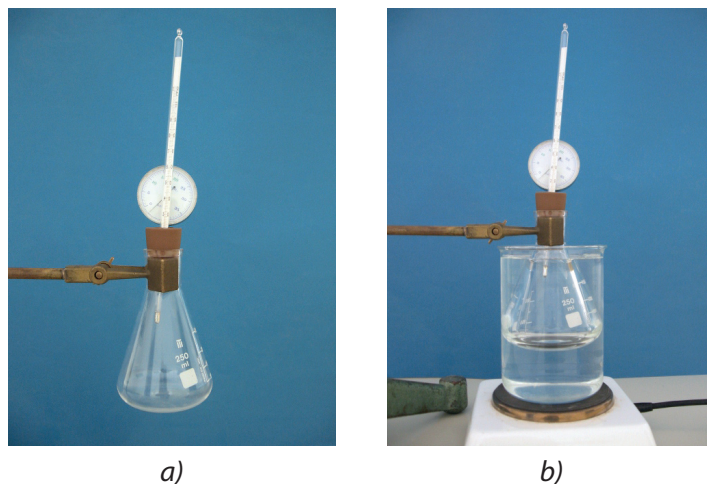
$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \Rightarrow T_2 = \frac{V_2}{V_1} T_1 = \frac{0,70 V_1}{V_1} \cdot 300 \text{ K} = 210 \text{ K}, t_2 = -63 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Izohorna promjena stanja plina. Na koji način tlak plina ovisi o temperaturi saznat ćemo ako mijenjamo temperaturu, a obujam plina održavamo stalnim. Takvu promjenu nazivamo **izovolumna** ili **izohorna** promjena stanja plina.

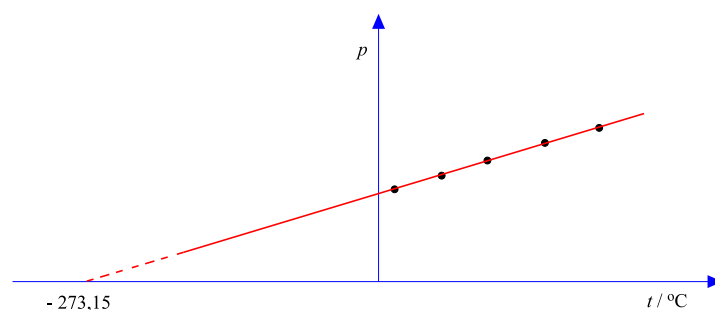
Izmjerimo li vrijednosti tlaka za nekoliko različitih temperatura, možemo grafički prikazati međusobnu ovisnost tih veličina u p, t -koordinatnom sustavu. Grafički prikaz ima oblik kosog pravca (slika 1.10.), a nazivamo ga **izohora**. Izohora sadrži stanja plina istoga obujma.

Pokus

Izohornoj promjeni možemo podvrgnuti zrak zatvoren u tikvici (slika 1.9.a). Zagrijavamo ga vodom koja se nalazi u laboratorijskoj čaši na kuhu (slika 1.9.b). Povećanjem temperature zraka povećava se i njegov tlak, a obujam se ne mijenja. Tlak zraka u tikvici dobijemo zbrajanjem atmosferskog tlaka i tlaka što ga pokazuje manometar.



Slika 1.9.
Uređaj za istraživanje ovisnosti tlaka plina o temperaturi



Slika 1.10.
Promjena tlaka razmjerna je promjeni temperature

Promjena tlaka ovisna je i o njegovoj početnoj vrijednosti (p_0). Zanimljivo je da su ovisnost tlaka plina o temperaturi uz stalan obujam i ovisnost obujma plina o temperaturi uz stalan tlak jednaka oblika.

Dakle:

$$p = p_0(1 + \alpha \Delta t),$$

ili uz početnu temperaturu jednaku nuli:

$$p = p_0(1 + \alpha t).$$

Čak i toplinski koeficijent promjene tlaka plina (α) ima jednak iznos kao toplinski koeficijent širenja

$$\left(3,66 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} = \frac{1}{273,15 \text{ K}} \right).$$

Posljednja jednadžba predstavlja **Charlesov zakon**. Možemo ga pisati i jednostavnije ako temperaturu iskažemo u kelvinima:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad \text{ili} \quad \frac{p}{T} = \text{konst.}$$

Kvocijent tlaka i termodinamičke temperature određene količine plina uz stalan obujam je stalan.

Primjer:

Koliko se puta poveća tlak plina u žarulji ako se nakon paljenja temperatura u njoj poveća od 27 °C do 300 °C?

Rješenje:

$$t_1 = 27 \text{ °C}, T_1 = 300 \text{ K}$$

$$t_2 = 300 \text{ °C}, T_2 = 573 \text{ K}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = ?$$

Riječ je o izohornoj promjeni stanja plina pa do rješenja dolazimo primjenom Charlesova zakona:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \Rightarrow \frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{573 \text{ K}}{300 \text{ K}}, \quad \frac{p_2}{p_1} = 1,91.$$

Pitanja:

1. Kojim trima veličinama opisujemo stanje plina?
2. Kako glase jednadžbe koje opisuju izobarnu promjenu stanja plina? Koji je to zakon?
3. Nacrtajte izobaru u p, V -koordinatnom sustavu.
4. Što će se dogoditi s obujmom plina ako mu pri stalnom tlaku udvostručimo termodinamičku temperaturu?
5. Koji zakon opisuje promjenu stanja plina uz stalan obujam? Napišite izraze za taj zakon.
6. Nacrtajte izohoru u p, V -koordinatnom sustavu.

Zadaci:

1. Neki plin mase 24 g ima pri temperaturi od 17 °C gustoću od 6 kg m⁻³. Koliki je obujam plina nakon izobarnog zagrijavanja do 127 °C?
2. U balonu se pri temperaturi od 20 °C nalaze 2 litre zraka. Za koliko se °C mora povećati temperatura zraka u balonu da bi se obujam povećao za 100 cm³?

Louis Joseph Gay-Lussac (1778. – 1850.) francuski je fizičar i kemičar. Poznat po radovima o termičkom širenju i kemijskim reakcijama plinova. Dizao se balonom do visine od 7 000 m istražujući sastav zraka i promjene Zemljina magnetizma.

