

MINISTERUL EDUCAȚIEI AL REPUBLICII MOLDOVA

Mihai MARINCIUC
Spiridon RUSU

Fizică

Manual pentru clasa a 11-a



Știința, 2014

Elaborat conform curriculumului disciplinar în vigoare și aprobat prin Ordinul ministrului educației (nr. 608 din 06 iunie 2014). Editat din sursele financiare ale *Fondului Special pentru Manuale*.

Contribuția autorilor la elaborarea manualului:

Mihai Marinciuc, Spiridon Rusu – capitolele II, IV, V.
Spiridon Rusu – capitolele I, III.

Comisia de evaluare: *Valeriu Canțer*, academician, Academia de Științe a Moldovei; *Eleodor Lupășcu*, doctor în fizică, conferențiar, Universitatea Agrară de Stat din Moldova; *Vladimir Ghețu*, profesor școlar, grad didactic superior, Liceul Teoretic „George Meniuc”, Chișinău

Recenzenți: *Mihai Șleahțișchi*, doctor în psihologie și pedagogie, conferențiar universitar, Universitatea Liberă Internațională din Moldova; *Alexei Colibneac*, maestru în arte, profesor universitar, Academia de Muzică, Teatru și Arte Plastice; *Tatiana Cartaleanu*, doctor în filologie, conferențiar universitar, Universitatea Pedagogică de Stat „Ion Creangă”; *Ion Geru*, doctor habilitat în științe fizico-matematice, profesor universitar, membru corespondent al AȘM; *Simion Băncilă*, doctor în fizică, profesor universitar, Universitatea de Stat „Alec Russo”, Bălți

Redactor: *Mariana Belenciuc*

Corectori: *Maria Cornesco, Angela Golban*

Redactor tehnic: *Nina Duduciuc*

Machetare computerizată: *Vitalie Ichim*

Copertă: *Eduard Toacă*

Întreprinderea Editorial-Poligrafică ȘTIINȚA,

str. Academiei, nr. 3; MD-2028, Chișinău, Republica Moldova;

tel.: (+373 22) 73-96-16; fax: (+373 22) 73-96-27;

e-mail: prini@stiinta.asm.md; prini_stiinta@yahoo.com; www.stiinta.asm.md

DIFUZARE:

Republica Moldova: ÎM Societatea de Distribuție a Cărții PRO-NOI

str. Alba-Iulia, nr. 75; MD-2051, Chișinău;

tel.: (+373 22) 51-68-17, 71-96-74; fax: (+373 22) 58-02-68;

e-mail: info@pronoi.md; www.pronoi.md

Toate drepturile asupra acestei ediții aparțin Întreprinderii Editorial-Poligrafice *Știința*.

Descrierea CIP a Camerei Naționale a Cărții

Marinciuc, Mihai

Fizică: Man. pentru cl. a 11-a/Mihai Marinciuc, Spiridon Rusu; Min. Educației al Rep. Moldova. – Ch.: Î.E.P. *Știința*, 2014 (Tipogr. „BALACRON” SRL). – 252 p.

ISBN 978-9975-67-927-5

53 (075.3)

CUPRINS*

TERMODINAMICA ȘI FIZICA MOLECULARĂ

CAPITOLUL I. TEORIA CINETICO-MOLECULARĂ A GAZULUI IDEAL

1.1. Sistem termodinamic. Parametri de stare	8
1.2. Principiile fundamentale ale teoriei cinetico-moleculare. Structura discretă a substanței	10
1.3. Forțe de interacțiune a moleculelor. Energiile cinetică și potențială	14
1.4. Modele cinetico-moleculare ale stărilor de agregare	16
1.5. Teoria cinetico-moleculară a gazului ideal	17
1.6. Temperatura. Scări de temperatură	22
1.7. Ecuația de stare a gazului ideal	24
1.8. Transformări simple ale gazului ideal	
a. Legea transformării izoterme	27
Lucrare de laborator. Verificarea experimentală a legii Boyle–Mariotte	28
b. Legea transformării izobare	30
c. Legea transformării izocore	31
d. Legile Gay-Lussac și Charles exprimate prin temperatura absolută	32
e. Ecuația termică de stare a gazului ideal	34
Test de evaluare sumativă. Profil real	42
Test de evaluare sumativă. Profil umanist	44

CAPITOLUL II. BAZELE TERMODINAMICII

2.1. Energia internă a gazului ideal	
a. Energia internă – mărime de stare	46
b. Energia internă a gazului ideal monoatomic	47
2.2. Lucrul gazului în procesele termodinamice	49
2.3. Cantitatea de căldură. Coeficienții calorici	53
2.4. Principiul întâi al termodinamicii și aplicarea lui la diferite procese	
a. Principiul întâi al termodinamicii	56
b. Aplicarea principiului întâi al termodinamicii la transformările simple ale gazului ideal	58

* Temele marcate convențional cu (*) sînt obligatorii pentru profilul real, iar cele nemarcate sînt obligatorii pentru ambele profiluri.

2.5. Motoare termice. Randamentul	
a. Motoare cu ardere internă	67
b. Principiul de funcționare a motoarelor termice. Randamentul	69
c. *Mașini frigorifice	70
2.6. Principiul al doilea al termodinamicii	
a. *Procese reversibile și ireversibile	73
b. *Principiul al doilea al termodinamicii	75
c. Ciclul Carnot. Valoarea maximă a randamentului	77
2.7. Mașinile termice și protecția mediului	80
Test de evaluare sumativă. Profil real	83
Test de evaluare sumativă. Profil umanist	85

CAPITOLUL III. LICHIDE ȘI SOLIDE. TRANSFORMĂRI DE FAZĂ

3.1.* Structura și proprietățile generale ale lichidelor	87
3.2.* Fenomene superficiale	
a. Stratul superficial. Coeficientul tensiunii superficiale	88
Lucrare de laborator.* Studiul fenomenelor superficiale	92
b. Forma stratului superficial. Fenomene capilare	93
3.3.* Structura și proprietățile generale ale solidelor	
a. Substanțe cristaline	97
b. Substanțe amorfe	99
c. Cristale lichide	100
3.4.* Deformarea corpurilor solide. Legea lui Hooke	102
3.5.* Dilatarea solidelor și lichidelor	106
3.6.* Vaporizarea și condensarea	
a. Evaporarea. Vaporii nesaturanți și vaporii saturanți	110
b. Umiditatea aerului. Măsurarea umidității	113
c. Fierberea. Temperatura de fierbere	115
3.7.* Topirea și solidificarea. Sublimarea și desublimarea	121
3.8.* Calorimetria. Ecuația calorimetrică	125
Lucrare de laborator.* Determinarea căldurii latente specifice de topire a gheții	129
Test de evaluare sumativă. Profil real	131

ELECTRODINAMICA

CAPITOLUL IV. ELECTROSTATICA

4.1. Sarcinile electrice. Legea conservării sarcinii electrice.	
Legea lui Coulomb	134
4.2. Câmpul electric. Intensitatea câmpului electric	140
4.3. Lucrul câmpului electric la deplasarea sarcinii punctiforme.	
Potențialul electric	
a. Câmpul electrostatic – câmp potențial	146
b. Lucrul câmpului electric. Potențialul electric	147
c.*Suprafețe echipotențiale	151
4.4. Conductoarele în câmp electrostatic	154
4.5. Dielectricii în câmp electrostatic	157
4.6. Capacitatea electrică. Condensatoarele	
a. Capacitatea electrică a condensatorului	162
b. Capacitatea electrică a condensatorului plan	164
c.*Gruparea condensatoarelor	166
d.*Capacitatea electrică a unui conductor izolat	167
4.7. Energia câmpului electric	172
4.8.* Mișcarea particulelor încărcate în câmp electric omogen	176
Test de evaluare sumativă. Profil real	181
Test de evaluare sumativă. Profil umanist	183

CAPITOLUL V. ELECTROKINETICA.

CURENTUL ELECTRIC ÎN DIFERITE MEDII

5.1. Curentul electric. Noțiuni fundamentale	
a. Curentul electric staționar. Intensitatea curentului	185
b. Condițiile de existență a curentului electric continuu.	
Tensiunea electromotoare.....	187
5.2. Legile curentului electric staționar	
a. Legea lui Ohm pentru o porțiune omogenă de circuit.	
Rezistența electrică	189
b. Lucrul și puterea curentului electric. Legea lui Joule	192
c. Legea lui Ohm pentru un circuit întreg	194
5.3.* Măsurarea intensității curentului și a tensiunii electrice. Potentiometrul	
a.*Măsurarea intensității curentului. Șuntul ampermetrului	201
b.*Măsurarea tensiunii electrice. Rezistența adițională	202
c.*Potentiometrul	203

5.4.* Aparate electrice de măsurat	
a.*Caracteristica aparatelor electrice de măsurat și clasificarea lor	204
b.*Erorile aparatelor electrice de măsurat	206
Lucrarea de laborator 1.* Determinarea rezistenței interne	
și a <i>t.e.m.</i> a unei surse de tensiune	208
Lucrarea de laborator 2.* Determinarea rezistivității unui conductor	209
5.5. Curentul electric în metale	
a. Conducția electrică a metalelor	211
b.*Legea lui Ohm în teoria electronică a metalelor	212
c.*Legea lui Joule în teoria electronică a metalelor	213
d. Dependența rezistivității metalelor de temperatură	214
e.*Supraconductibilitatea	215
5.6. Curentul electric în semiconductoare	
a. Proprietățile electrice ale semiconductoarelor	219
b. Purtătorii liberi de sarcină electrică în semiconductoare.	
Conducția intrinsecă	221
c. Semiconductoare cu impurități. Conducția extrinsecă	223
d. Joncțiunea <i>p-n</i> . Dioda semiconductoare	224
e. Tranzistorul	226
5.7. Curentul electric în electroliți	
a. Disocierea electrolică. Purtătorii de sarcină electrică	
în electroliți. Electroliza	228
b.*Legile lui Faraday	229
c. Aplicații ale electrolizei	231
5.8. Curentul electric în gaze	
a. Descărcarea electrică neautonomă	234
b. Descărcarea autonomă în gaze. Aplicații	236
c.*Plasma	238
5.9. Curentul electric în vid	
a. Emisia termoelectronică. Dioda cu vid. Trioda	240
b.*Tubul cu fascicul electronic	242
Test de evaluare sumativă. Profil real	244
Test de evaluare sumativă. Profil umanist	246
Răspunsuri la probleme	248



TERMODINAMICA ȘI FIZICA MOLECULARĂ

Există un grup de fenomene fizice care nu pot fi explicate cu ajutorul legilor mecanicii clasice studiate anterior. De exemplu, trecerea substanței dintr-o stare de agregare în alta, schimbul de căldură dintre corpurile aflate în diferite stări de încălzire, efectuarea unui lucru mecanic pe seama căldurii comunicate și, invers, modificarea proprietăților fizice ale substanței odată cu variația temperaturii ei etc. Toate fenomenele enumerate au un indiciu comun – depind de gradul de încălzire a substanței, adică de temperatură. Ele au fost numite **fenomene termice**.

Pentru studiul fenomenelor termice se folosesc două metode, care se completează reciproc: **metoda cinetico-moleculară**, sau **statistică**, și **metoda termodinamică**.

TEORIA CINETICO-MOLECULARĂ A GAZULUI IDEAL

1.1

SISTEM TERMODINAMIC. PARAMETRI DE STARE

Corpurile **macroscopice** (din gr. *macros* „mare”), ale căror proprietăți termice se studiază în teoria cinetico-moleculară și în termodinamică, sînt formate dintr-un număr foarte mare de atomi și molecule. Acestea reprezintă constituenți **microscopici** (din gr. *micros* „mic”) care, după cum vom vedea în continuare, determină proprietățile termice ale corpurilor. Pentru descrierea fenomenelor termodinamice, s-au dezvoltat concomitent două teorii.

Teoria cinetico-moleculară – studiază proprietățile termice ale diferitor sisteme fizice în baza structurii microscopice a acestora, adică considerîndu-le sisteme de atomi și molecule aflate într-o continuă mișcare dezordonată. Parametrii microscopici ai sistemelor cercetate (masa atomilor și moleculelor, viteza, impulsul și energia medie a acestora etc.) determină parametrii lor macroscopici. De exemplu, presiunea și temperatura sînt determinate de proprietățile ansamblului de molecule și niciodată nu se vorbește despre presiunea sau temperatura unei molecule.

Termodinamica – studiază proprietățile termice ale sistemelor fizice din punct de vedere macroscopic, fără a ține seama de structura lor internă atomo-moleculară. În acest caz se stabilesc relații cantitative dintre mărimile direct măsurabile (presiunea, volumul, temperatura etc.), iar cu ajutorul lor se cercetează interacțiunea și schimbul de energie dintre corpurile sistemului analizat, între ele și cu mediul înconjurător.

Corpul sau ansamblul de corpuri macroscopice studiat este numit **sistem termodinamic**. Corpurile incluse în acest sistem pot interacționa atît între ele, cît și cu corpuri din exteriorul sistemului.

După caracterul interacțiunii cu mediul exterior, sistemele termodinamice se clasifică în:

- **sisteme deschise** – ce fac schimb de substanță și de energie cu mediul exterior. De exemplu: oxigenul evacuat parțial dintr-un balon își micșorează masa pe măsura evacuării; lichidul dintr-un vas deschis își micșorează masa prin evaporare etc.;

- **sisteme închise** – ce nu fac schimb de substanță cu mediul exterior, dar pot face

schimb de energie. De exemplu, gazul conținut într-un vas închis care se încălzește în urma acțiunii razelor solare ș.a.;

– **sisteme izolate** – care nu fac nici schimb de energie, nici schimb de substanță cu mediul exterior. De exemplu, lichidul dintr-un termos cu dop de plută.

Totalitatea proprietăților sistemului de molecule, la un moment dat, caracterizează o **stare** a sistemului. Mărimile fizice măsurabile care descriu starea concretă a sistemului și caracterizează proprietățile acestuia sînt numite **parametri de stare**.

Relația care stabilește legătura dintre parametrii de stare se numește **ecuație de stare**.

Trecerea sistemului de molecule dintr-o stare în alta printr-un șir de stări intermediare se numește **proces termodinamic** sau **transformare termodinamică**.

Să analizăm noțiunile introduse din punctul de vedere al valabilității ecuației de stare. În acest scop, vom cerceta următorul exemplu. Să presupunem că avem un gaz oarecare cu volumul V_1 , aflat în condiții normale ($p_1 = 10^5$ Pa, $t_1 = 0^\circ\text{C}$), și dorim să efectuăm o transformare pentru a-l trece din starea 1 în starea 2, caracterizată de parametrii V_2 , p_2 și t_2 . În starea inițială, atîta timp cît asupra lui nu se exercită nicio acțiune din exterior, gazul este descris de parametrii V_1 , p_1 , t_1 , ale căror valori nu variază în timp. În asemenea cazuri se spune că starea sistemului este o **stare de echilibru termic**, care întotdeauna poate fi reprezentată grafic. Pentru aceasta se folosește un sistem de coordonate, pe abscisa și ordonata căruia se notează valorile parametrilor de stare ai sistemului. Astfel, starea 1 de echilibru este reprezentată în figura 1.1 prin punctul 1.

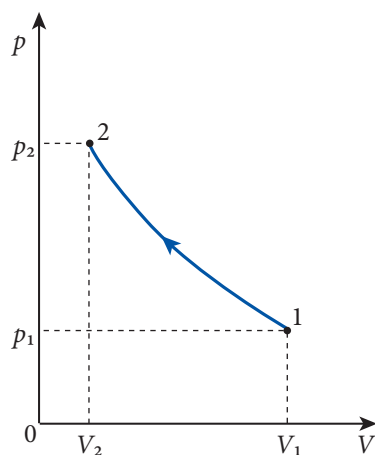


Fig. 1.1

Procesul în decursul căruia sistemul trece printr-un șir de stări intermediare de echilibru se numește **proces de echilibru**.

În acest caz trecerea unui gaz din starea inițială 1 în starea finală 2 trebuie să decurgă atît de lent, încît el să se afle continuu în stare de echilibru, adică să treacă mereu dintr-o stare de echilibru în alta. Procesul respectiv poate fi reprezentat grafic printr-o curbă (fig. 1.1), iar ecuația de stare descrie cantitativ această transformare.

Experimentele demonstrează că, după un anumit timp, **sistemul izolat trece obligatoriu în starea de echilibru termic**. Această afirmație este cunoscută sub numele de **principiul zero al termodinamicii**.

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Care sînt cele două teorii folosite la descrierea fenomenelor termodinamice? Caracterizați-le.
2. Prin ce diferă sistemele închise de cele izolate?
3. Prin ce se caracterizează o stare a unui sistem?
4. Ce reprezintă parametrii de stare?

5. În ce condiții se realizează starea de echilibru termic? Dați exemple.
6. Ce reprezintă procesul de echilibru termic? Explicați posibilitatea redării grafice a acestui proces.
7. La studiul experimental al proceselor de echilibru se impune condiția de variație cât mai lentă a parametrilor de stare. Explicați acest lucru.

1.2 PRINCIPIILE FUNDAMENTALE ALE TEORIEI CINETICO-MOLECULARE. STRUCTURA DISCRETĂ A SUBSTANȚEI

Diversitatea stărilor de agregare ale substanței, precum și esența multor fenomene fizice pot fi înțelese numai dacă studiem structura internă a substanței. Datele experimentale obținute în urma cercetării acesteia sub diferite aspecte ne permit să concluzionăm că substanța are o structură discretă sau granulară, adică este compusă din particule mici.

Cea mai mică particulă dintr-o substanță care păstrează proprietățile chimice ale acesteia se numește **moleculă**.

La rîndul ei, molecula este formată din una sau din mai multe particule, identice ori diferite, numite **atomi**. Dacă atomii care formează moleculele sînt identici, atunci substanța alcătuită dintr-un astfel de ansamblu de particule este numită **simplă**, adică nu poate fi descompusă în produse mai simple (de exemplu: hidrogenul, clorul, fierul ș.a.). În cazul în care moleculele sînt formate din atomi diferiți, substanța respectivă se numește **compusă** și poate fi descompusă în constituenți simple (de exemplu: dioxidul de carbon, apa, sarea de bucătărie ș.a.). Concepția despre structura atomică a substanței a fost formulată încă în Antichitate (Leucip, 490–430 î.Hr.; Democrit, 460–370 î.Hr. ș.a.), însă dezvoltarea teoretică a ideilor atomiste a fost posibilă abia atunci cînd rezultatele experimentale au determinat elaborarea unei astfel de teorii.

Un șir de fenomene fizice, cum ar fi difuziunea, evaporarea, fierberea ș.a., demonstrează că moleculele substanței se află într-o continuă mișcare dezordonată.

La contactul a două substanțe, indiferent de starea de agregare în care ele se află, are loc pătrunderea reciprocă a moleculelor unei substanțe printre moleculele celeilalte, fără vreo acțiune din exterior. Acest fenomen se numește **difuziune**.

El poate fi explicat numai presupunîndu-se că moleculele substanței se mișcă dezordonat. Atmosfera Pămîntului constituie un amestec de oxigen, azot, dioxid de carbon, vapori de apă și de unele cantități mici de gaze inerte. Dacă nu ar exista mișcarea continuă și dezordonată a moleculelor, atunci sub acțiunea forțelor de greutate acestea s-ar depune pe suprafața Pămîntului.

Un rol decisiv în verificarea experimentală a ipotezei despre structura discretă a substanței și în demonstrarea mișcării haotice a moleculelor l-a avut **mișcarea browniană**.

În anul 1827, botanistul englez Robert Brown, urmărind la microscop o suspensie (coloidală) de polen în apă, a constatat că particulele de polen se află într-o mișcare

continuă și dezordonată, descriind niște traiectorii ciudate. Unicul factor extern care influența această mișcare era temperatura: cu cât aceasta era mai înaltă, cu atât mișcarea devenea mai intensă. Mai târziu s-a observat că aceleași mișcări sînt caracteristice și pentru alte particule în suspensie, indiferent de natura lor. Fizicianul austriac Felix Ehrenhaft (1879–1952) și fizicianul francez Louis de Broglie (1892–1987) au studiat mișcarea particulelor din fum suspendate în aer și au stabilit aceleași particularități ale mișcării lor ca și ale particulelor de polen suspendate în apă. Fenomenul de agitație a particulelor foarte mici aflate în suspensie a fost numit **mișcare browniană**, iar particulele respective – **particule browniene**.

Mult timp mișcarea browniană a rămas fără explicație. Pe parcursul anilor au fost formulate și verificate diferite ipoteze, însă abia în 1876 chimistul și fizicianul britanic William Ramsay (1852–1916) a presupus că acest fenomen poate fi explicat numai prin mișcarea moleculelor lichidului în care se află particulele browniene. Această ipoteză permite o explicație simplă a mișcării browniene: mișcarea particulelor în suspensie este rezultatul lovirii lor de moleculele lichidului, care le transmit un anumit impuls.

Dimensiunile particulelor browniene, deși mici, sînt mult mai mari decît cele ale moleculelor. Astfel, numărul de ciocniri ce revine unor porțiuni ale suprafeței particulei browniene este diferit și rezultanta impulsului primit de ea poate fi alta decît zero. Așadar, particula browniană se va mișca în direcția ce coincide cu cea a impulsului resultant. Deoarece masa ei este mult mai mare decît masa moleculelor de lichid, viteza particulei este mult mai mică decît cea a moleculelor, astfel încît mișcarea browniană poate fi ușor urmărită la microscop. Dacă vom înregistra poziția particulei browniene după intervale egale de timp și le vom uni cu segmente de dreaptă, atunci se va obține o linie frîntă asemănătoare cu cea din *figura 1.2*, unde $\vec{s}_1, \vec{s}_2, \dots, \vec{s}_n$ sînt deplasările particulei în fiecare interval de timp, iar \vec{s} este deplasarea ei în decursul observării.

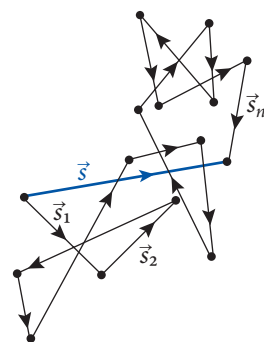


Fig. 1.2

Teoria cantitativă a mișcării browniene a fost elaborată în anul 1905 de fizicianul german Albert Einstein (1879–1955), care a demonstrat că această mișcare complet dezordonată se supune unor legi probabilistice strict determinate. Cercetările experimentale efectuate de fizicianul francez Jean Perrin (1870–1942) în anii 1906–1908, independent de fizicianul polonez Marian Smoluchowski (1872–1917), au confirmat întru totul teoria lui Einstein. Mai mult decît atât, cu ajutorul acestei teorii J. Perrin a determinat experimental valoarea numărului lui Avogadro și masa moleculei. Existența atomilor și a moleculelor a devenit, astfel, o realitate obiectivă.

Din cele expuse mai sus, se poate concluziona că la baza teoriei cinetico-moleculare a substanței se află următoarele principii confirmate experimental:

- Substanța este compusă din particule.
- Particulele substanței se află într-o continuă mișcare haotică.
- Particulele interacționează între ele.

Mărimile folosite pentru caracteristica cantitativă a structurii discrete a substanței sînt cunoscute din cursul gimnazial de chimie. Să recapitulăm succint cunoștințele de bază despre aceste mărimi și unitățile lor.

În calitate de unitate de masă a atomilor și moleculelor este luată a 12-a parte din masa atomului izotopului de carbon ^{12}C , numită **unitate atomică de masă** (cu simbolul **u**):

$$1 \text{ u} = \frac{1}{12} m_{\text{oc}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}.$$

Numărul care arată de cîte ori masa unei molecule (a unui atom) m_0 este mai mare decît a 12-a parte din masa m_{oc} a atomului de carbon ^{12}C se numește **masă moleculară (atomică) relativă** M_r :

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{\text{oc}}} = \frac{m_0}{1 \text{ u}}. \quad (1.1)$$

După cum se observă din (1.1), M_r este o mărime adimensională. Masa moleculară relativă a moleculelor compuse este egală cu suma maselor atomice relative ale componentelor substanței.

Continutul de substanță care conține tot atîtea particule cîte atomi există în 0,012 kg de carbon ^{12}C se numește **mol** (cu simbolul **mol**).

Acest număr de particule este același pentru orice substanță, indiferent de natura ei, și se numește **numărul lui Avogadro** N_A .

Masa unui mol de substanță este numită **masă molară** și se notează cu litera M . După cum rezultă din definiția de mai sus, masa molară a carbonului este $M_{\text{C}} = 0,012 \text{ kg/mol}$, iar numărul lui Avogadro:

$$N_A = \frac{M_{\text{C}}}{m_{\text{oc}}} = \frac{0,012 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}{12 \text{ u}} = \frac{10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}{\text{u}} = \frac{10^{-3}}{1,66 \cdot 10^{-27}} \cdot \frac{1}{\text{mol}} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}.$$

Pentru masa molară a unei substanțe la care masa moleculei este m_0 , avem:

$$M = N_A \cdot m_0 = \frac{10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}{\text{u}} \cdot M_r \cdot \text{u} = 10^{-3} M_r \frac{\text{kg}}{\text{mol}}. \quad (1.2)$$

Mărimile egale cu numărul de moli pe care îl conține o substanță se numesc **cantitate de substanță** ν .

Dacă notăm masa substanței cu m , atunci:

$$\nu = \frac{m}{M} \quad \text{sau} \quad \nu = \frac{N}{N_A}, \quad (1.3)$$

unde N este numărul de molecule conținute în substanța dată. Unitatea cantității de substanță este **molul** și reprezintă una dintre unitățile fundamentale ale **Sistemului Internațional (SI) de Unități**. Deseori se mai folosește un multiplu al molului – **kilomolul**: **1 kmol = 10^3 mol**.

Studiul experimental al proprietăților gazelor a arătat că volumul unui mol al oricărui gaz aflat în **condiții normale** ($t = 0^\circ\text{C}$, $p = 760 \text{ mm Hg} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$) este același. El a fost numit **volum molar** în condiții normale și are valoarea:

$$V_M = 22,42 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}} = 22,42 \frac{\text{L}}{\text{mol}}. \quad (1.4)$$

Acest rezultat este cunoscut ca **legea lui Avogadro**.

Problemă rezolvată

Determinați:

- numărul moleculelor din 1 mm^3 de apă;
- masa unei molecule de apă și diametrul ei, considerînd moleculele sferice.

Rezolvare

- a)** Numărul moleculelor dintr-o substanță se determină din relația (1.3), unde masa m se înlocuiește cu produsul ρV din definiția densității substanței. Așadar, obținem:

$$N = \frac{\rho V}{M} N_A.$$

Calculăm masa molară a apei (H_2O): $M = (2 \cdot 1 + 16) \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$. Densitatea ei $\rho = 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Pentru numărul de molecule din $V = 1 \text{ mm}^3 = 10^{-9} \text{ m}^3$ de apă obținem:

$$N = \frac{10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 10^{-9} \text{ m}^3}{18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}} \approx 3,34 \cdot 10^{19} \text{ molecule.}$$

- b)** Din (1.2) pentru masa unei molecule de apă obținem:

$$m_0 = \frac{M}{N_A} = \frac{18 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} \approx 3 \cdot 10^{-26} \text{ kg.}$$

Considerînd moleculele sferice, volumul unei molecule este aproximativ:

$$V_0 \approx \frac{\pi}{6} d^3,$$

de unde se obține diametrul d :

$$d \approx \sqrt[3]{\frac{6V_0}{\pi}}.$$

Pe de altă parte, volumul unei molecule V_0 este egal cu raportul dintre volumul molar și numărul de molecule din el, iar volumul molar se exprimă prin densitate $\left(\rho = \frac{M}{V_M}\right)$. Așadar,

$$V_0 = \frac{V_M}{N_A} = \frac{M}{\rho N_A}$$

și pentru diametrul moleculei de apă avem:

$$d \approx \sqrt[3]{\frac{6M}{\pi \rho N_A}}; d \approx 3,85 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 0,385 \text{ nm.}$$

1. Care sînt fenomenele ce confirmă mișcarea moleculelor?
2. Cum se explică creșterea intensității difuziunii la mărirea temperaturii?
3. De ce nu se observă mișcarea haotică a firicelelor de mac introduse în apă? Ce se va întîmpla dacă vom mări temperatura apei?
4. Care sînt principiile fundamentale ale teoriei cinetico-moleculare?
5. Ce reprezintă unitatea atomică de masă?
6. Definiți masa moleculară (atomică) relativă a substanței.
7. Ce reprezintă molul?
8. Cum se calculează masa moleculară relativă a unei molecule compuse? Dar masa molară?
9. Calculați masa moleculară relativă și masa molară a propanului (C_3H_8).
10. Calculați masa unei molecule de metan (CH_4).
11. Determinați numărul de molecule dintr-o picătură de apă cu masa de 2 g și din una de mercur cu aceeași masă. Comparați rezultatele obținute.
12. Cîte molecule de gaz conține un recipient cu volumul de 200 cm^3 , dacă gazul se află în condiții normale?
13. Cîte molecule conține o masă $m = 1\text{ kg}$ de etan (C_2H_6)?
14. Determinați masa unei bucăți de aur care conține același număr de atomi ca și o bucată de aluminiu cu masa de 1 kg.
15. În timp de o zi s-au evaporat 50 g de apă. Cîte molecule se desprind de pe suprafața apei în fiecare secundă?
16. Pe suprafața apei a căzut o picătură de petrol cu masa de 0,2 mg, care a format o peliculă cu aria de 200 cm^2 . Considerînd că moleculele de petrol s-au așezat în două straturi, determinați diametrul lor. Densitatea petrolului este de $0,83 \cdot 10^3\text{ kg/m}^3$.

1.3

FORȚE DE INTERACȚIUNE A MOLECULELOR. ENERGIILE CINETICĂ ȘI POTENȚIALĂ

Studiul experimental al structurii substanței a arătat că orice atom este compus din particule cu sarcină pozitivă (nucleul) și altele cu sarcină negativă (electronii). În condiții obișnuite, atomii și moleculele sînt neutre din punct de vedere electric, deoarece valoarea sarcinii pozitive este egală cu cea a sarcinilor negative. Întrucît sarcinile de același semn se resping, iar cele de semn opus se atrag, în timpul mișcării dezordonate a moleculelor între ele vor apărea atît forțe de atracție $\vec{F}_{\text{atr.}}$, cît și forțe de respingere $\vec{F}_{\text{resp.}}$. Rezultanta acestor forțe $\vec{F} = \vec{F}_{\text{atr.}} + \vec{F}_{\text{resp.}}$ caracterizează interacțiunea dintre molecule și este numită **forță intermoleculară**.

Fie un sistem simplificat compus din două molecule A și B care interacționează. Vom considera molecula A fixă, iar poziția moleculei B mobile determinată de vectorul de poziție \vec{r} trasat din A în B (fig. 1.3, a). După cum se vede din figură, forța de atracție $\vec{F}_{\text{atr.}}$ este de sens opus vectorului \vec{r} , iar $\vec{F}_{\text{resp.}}$ are același sens cu \vec{r} . Atunci proiecțiile acestor forțe pe direcția \vec{r} întotdeauna vor fi, corespunzător, $F_{\text{atr.}}$ – negativă și $F_{\text{resp.}}$ – pozitivă. După cum arată cercetările experimentale și cele teoretice, forțele de respingere variază

cu distanța mult mai repede decât forțele de atracție. Din această cauză, forța intermoleculară $F = F_{\text{resp.}} - F_{\text{atr.}}$ ia atât valori pozitive ($F_{\text{resp.}} > |F_{\text{atr.}}|$), cât și negative ($F_{\text{resp.}} < |F_{\text{atr.}}|$) (fig. 1.3, b). Distanța $r = r_0$, pentru care $|F_{\text{atr.}}| = |F_{\text{resp.}}|$ ($F = 0$), corespunde echilibrului stabil al moleculelor și este numită **distanță de echilibru**. Pentru $r < r_0$ în sistem predomină forțele de respingere. Distanța $r = d$, la care se manifestă foarte puternic forțele de respingere, este numită **diametru eficace** al moleculei.

Odată cu creșterea distanței $r > r_0$ în sistem încep să predomine forțele de atracție și pentru $r = r'$ forța intermoleculară $|F|$ capătă o valoare maximă. Pentru $r > r'$, $|F|$ se micșorează repede pînă la zero.

Distanța minimă dintre molecule $r = r_m$ (fig. 1.3, b) la care forțele intermoleculare pot fi neglijate este numită **rază de acțiune moleculară** și constituie aproximativ de la 3 pînă la 4 diametre eficace. Cu alte cuvinte, forțele intermoleculare se manifestă la distanțe ce sînt de același ordin cu dimensiunile moleculelor.

Să cercetăm acum interacțiunea moleculelor din punct de vedere energetic. Deoarece moleculele interacționează, ele posedă nu numai energie cinetică, determinată de mișcarea lor, ci și energie potențială.

Fie că molecula B se apropie de molecula fixă A de la o distanță mare $r > r_m$, unde energia potențială de interacțiune $E_p = 0$. Intrînd în raza de acțiune a moleculei A, unde predomină forțele de atracție, viteza moleculei B crește, astfel crescînd și energia cinetică a ei. După cum rezultă din legea conservării energiei $E_c + E_p = \text{const.}$, creșterea energiei cinetice duce la micșorarea celei potențiale. Cînd distanța dintre molecule va fi egală cu cea de echilibru $r = r_0$, energia potențială va deveni minimă (fig. 1.3, c). La micșorarea ulterioară a distanței dintre molecule $r < r_0$ încep să predomină forțele de respingere, care micșorează viteza

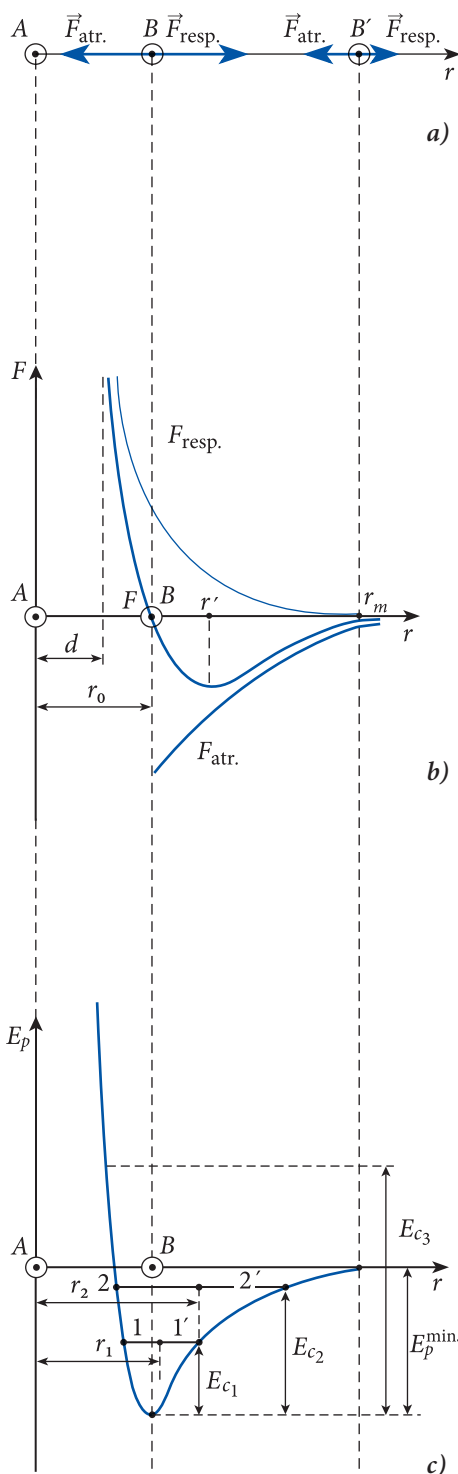


Fig. 1.3

moleculii B și în consecință energia cinetică se va micșora, iar cea potențială va crește. Partea graficului energiei potențiale din vecinătatea valorii minime se numește **groapă de potențial**.

Să ne imaginăm că moleculele sistemului nu posedă energie cinetică. În acest caz, ele s-ar fi plasat la distanța r_0 , care corespunde stării echilibrului stabil, iar energia potențială ar fi fost $E_p = E_p^{\min.}$.

În realitate, moleculele întotdeauna posedă energie cinetică și din această cauză distanța dintre ele poate fi atât mai mare, cât și mai mică decât r_0 . Dacă energia cinetică este mai mică decât valoarea minimă a celei potențiale $E_{c1} < |E_p^{\min.}|$, atunci mișcarea moleculei B este limitată de pereții gropii de potențial în punctele 1 și 1', unde energia cinetică se transformă complet în energie potențială. În consecință, molecula B cu energia E_{c1} se va afla la o distanță medie r_1 față de molecula A , unde energia ei potențială este minimă. Din *figura 1.3, c* se observă că pentru o stare a moleculei B cu energia cinetică E_{c2} , unde $E_{c1} < E_{c2} < |E_p^{\min.}|$, distanța medie r_2 față de molecula A crește. Această creștere a distanței dintre molecule explică dilatarea solidelor și lichidelor la încălzire (la ridicarea temperaturii se mărește energia cinetică).

Dacă energia cinetică a moleculei (E_{c3} în *figura 1.3, c*) este mai mare decât $|E_p^{\min.}|$, atunci ea părăsește groapa de potențial și distanța dintre molecule poate crește nelimitat (ca în cazul gazelor).

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Ce reprezintă forțele intermoleculare? Cum depind ele de distanța dintre molecule?
2. Explicați fenomenul de dilatare a solidelor și a lichidelor cu ajutorul interacțiunii moleculare.
3. Cum se explică, în baza legii conservării energiei, existența minimului energiei potențiale de interacțiune a moleculelor?

1.4

MODELE CINETICO-MOLECULARE ALE STĂRILOR DE AGREGARE

Studiul proprietăților substanței a arătat că ea se poate afla în diferite stări: solidă, lichidă sau gazoasă, numite **stări de agregare**. Pentru cercetarea mai detaliată a substanței în diferite stări de agregare, vom avea nevoie de anumite modele ale acestor stări.

Este deja cunoscut că forțele intermoleculare tind să mențină moleculele la o anumită distanță una față de alta, iar mișcarea lor haotică tinde să le disperseze în spațiu. Acțiunea concomitentă a acestor două tendințe determină starea de agregare a substanței.

Să revenim la *figura 1.3, c*. Atunci când molecula B se află în groapa de potențial $E_{c1} \ll |E_p^{\min.}|$, ea va efectua o mișcare de oscilație în jurul poziției de echilibru aflată la distanța r_1 . Forțele de interacțiune sînt atât de puternice, încît mișcarea dezordonată determinată de energia cinetică E_{c1} nu le poate învinge. Astfel, **starea solidă** este caracterizată de o rețea avînd o anumită formă regulată, numită **rețea cristalină**. Moleculele execută o mișcare dezordonată oscilatorie în jurul unor puncte numite **noduri** ale

rețelei. Substanța în stare solidă este caracterizată atât de formă proprie, cât și de volum propriu. Schematic, un asemenea model este reprezentat în figura 1.4, a.

Prin încălzirea substanței, energia cinetică a moleculelor crește, și atunci

când ea devine de același ordin cu energia potențială minimă $E_{c2} \sim |E_p^{\min}|$, substanța trece în **stare lichidă**. Într-adevăr, în acest caz unele molecule vor efectua o mișcare dezordonată de oscilație în jurul unor poziții de echilibru, iar altele vor avea posibilitatea să treacă în poziții de echilibru noi. Cu alte cuvinte, substanța capătă proprietatea de fluiditate și astfel își pierde capacitatea de a mai avea formă proprie, luând forma vasului în care este turnată. Modelul respectiv al stării lichide este prezentat în figura 1.4, b.

Dacă mărim în continuare temperatura, energia cinetică a moleculelor crește pînă într-atît încît ele pot părăsi ușor groapa de potențial $E_{c3} > |E_p^{\min}|$. În acest caz, forțele intermoleculare nu mai sînt în stare să mențină moleculele în sfera lor de acțiune și ele capătă posibilitatea de a se deplasa în întreg spațiul, adică substanța trece în **stare gazoasă**. Astfel, modelul stării gazoase (fig. 1.4, c) reprezintă mișcarea moleculelor cu energii potențiale neglijabile. Din cauza ciocnirilor, traiectoria unei molecule este o linie frîntă, formată din segmente inegale orientate dezordonat în spațiu.

Deoarece forțele de atracție aproape că lipsesc, gazul ocupă tot volumul oferit. Așadar, gazul nu are nici formă și nici volum propriu.

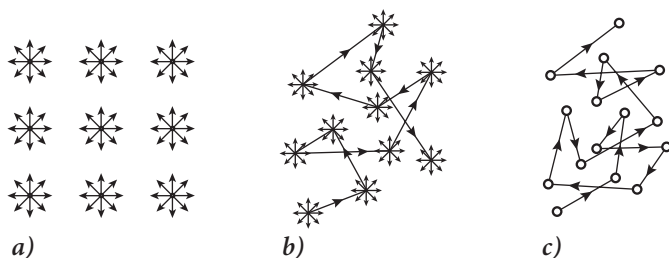


Fig. 1.4

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Cum se explică existența stărilor de agregare ale unei substanțe?
2. Descrieți modelul stării solide. Explicați de ce în această stare moleculele au o mișcare limitată.
3. De ce la creșterea temperaturii substanța trece din stare solidă în cea lichidă? Descrieți modelul stării lichide.
4. Care este deosebirea esențială a stării gazoase față de stările solidă și lichidă? Cum este în acest caz energia potențială de interacțiune a moleculelor?

1.5

TEORIA CINETICO-MOLECULARĂ A GAZULUI IDEAL

Legile gazului ideal obținute pe cale experimentală se demonstrează riguros în cadrul teoriei cinetico-moleculare. Conform acestei teorii, gazul reprezintă un număr enorm de molecule ce se mișcă haotic. În procesul de mișcare, moleculele gazului acționează cu o forță medie asupra pereților incintei în care ele se află, creînd astfel o anumită presiune.

Să determinăm această presiune. În fizica moleculară, la fel ca și în mecanică, este inevitabilă utilizarea unor modele idealizate, care sînt o reprezentare simplificată a structurii substanței. Cel mai simplu model al gazului este modelul gazului ideal, care se descrie în felul următor:

- moleculele (atomii) se consideră puncte materiale, adică dimensiunile lor sînt neglijabile în comparație cu distanțele dintre ele;
- forțele intermoleculare sînt neglijabile, adică moleculele (atomii) luate separat se mișcă de la o ciocnire la alta rectiliniu și uniform;
- ciocnirile moleculelor (atomilor) între ele și cu pereții vasului în care se află gazul sînt perfect elastice.

Acest model permite studierea chiar și a gazelor reale, dacă ele se află la presiuni mici și temperaturi nu prea joase. Odată cu creșterea presiunii sau/și micșorarea temperaturii, forțele intermoleculare nu mai pot fi neglijate, iar moleculele nu mai pot fi considerate puncte materiale. În acest caz, modelul gazului ideal nu mai poate fi aplicat.

Cu toate că modelul gazului ideal descrie foarte aproximativ situația reală, el totuși permite obținerea unor rezultate importante, chiar dacă ele sînt valabile numai în anumite limite.

Presupunem că N molecule ale unui gaz ideal, fiecare de masă m_0 , se află într-o incintă de forma unui cub cu latura l . Vom analiza mai întâi acțiunea exercitată de o singură moleculă asupra unui perete al incintei (de exemplu, cel din stînga). Cu alte cuvinte, se va urmări mișcarea de-a lungul direcției x a unei molecule cu viteza \vec{v}_1 (fig. 1.5). Molecula va acționa asupra peretelui cu o forță F_{1x} egală în mod și opusă ca sens celei cu care acționează peretele asupra moleculei F'_{1x} . Valoarea forței F'_{1x} , conform principiului fundamental al dinamicii, este egală cu viteza de variație a impulsului moleculei:

$$F'_{1x} = \frac{\Delta(m_0 v)_{1x}}{\Delta t},$$

unde Δt este durata ciocnirii. Deoarece ciocnirea, conform modelului gazului ideal, este perfect elastică, se va modifica numai componenta x a impulsului de la $m_0 v_{1x}$ pînă la $m_0 v'_{1x}$, unde $v'_{1x} = -v_{1x} = |v_{1x}|$. Atunci, în urma unei ciocniri, impulsul moleculei variază cu mărimea

$$\Delta(m_0 v)_{1x} = m_0 v'_{1x} - m_0 v_{1x} = -2m_0 v_{1x} = 2m_0 |v_{1x}|$$

și forța care acționează asupra moleculei din

partea peretelui este $F'_{1x} = -\frac{2m_0 v_{1x}}{\Delta t}$.

Molecula considerată acționează asupra peretelui incintei cu forța $F_{1x} = -F'_{1x} (|F_{1x}| = |F'_{1x}|)$ numai în momentul ciocnirii. În decursul unui timp τ , molecula se va ciocni cu peretele de N_1 ori. Forța medie \bar{F}_{1x} care acționează din partea unei molecule în

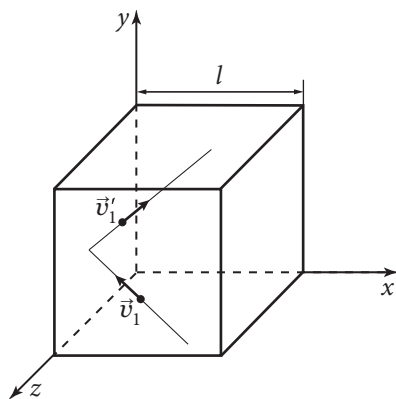


Fig. 1.5

timpul τ va fi considerabil mai mică decât forța $|F_{1x}|$ ce acționează din partea aceleiași molecule în timpul Δt , deoarece $\tau \gg \Delta t$:

$$\bar{F}_{1x} = 2m_0 |v_{1x}| \cdot \frac{N_1}{\tau}.$$

Numărul de ciocniri N_1 este egal cu raportul dintre distanța totală L parcursă de moleculă în timpul τ și distanța dintre două ciocniri succesive cu același perete. Deoarece $L = |v_{1x}| \tau$, iar distanța dintre două ciocniri succesive cu același perete este $2l$, atunci

$$N_1 = \frac{v_{1x} \tau}{2l}$$

și pentru forța medie care acționează asupra peretelui incintei din partea unei molecule obținem:

$$F_{1x} = 2m_0 v_{1x} \cdot \frac{|v_{1x}| \tau}{2l \tau} = \frac{m_0 v_{1x}^2}{l}.$$

În timpul mișcării în recipient, molecula se ciocnește și cu ceilalți pereți situați perpendicular pe direcția x , însă aceste ciocniri nu modifică proiecția impulsului pe direcția dată. În afară de aceasta, molecula se mai poate ciocni și cu alte molecule, ceea ce poate conduce la modificarea vitezei v_{1x} . Însă orice micșorare (sau creștere) a impulsului moleculei cercetate se va transmite altei molecule; aceasta îl va transmite la rândul său celei de-a treia ș.a.m.d. Deoarece vom lua în considerare forțele medii exercitate și de celelalte molecule, efectul respectiv nu modifică valoarea forței medii rezultante. Cu aceste precizări, forța medie rezultantă ce acționează pe direcția x din partea tuturor N molecule este

$$\bar{F}_x = \bar{F}_{1x} + \bar{F}_{2x} + \dots + \bar{F}_{Nx} = \frac{m_0}{l} (v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \dots + v_{Nx}^2). \quad (1.5)$$

Suma dintre paranteze în relația (1.5) se exprimă prin valoarea medie a pătratului componentei x a vitezei \bar{v}_x^2 . Într-adevăr,

$$v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \dots + v_{Nx}^2 = N \cdot \frac{v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \dots + v_{Nx}^2}{N} = N \bar{v}_x^2$$

și din relația (1.5) rezultă:

$$\bar{F}_x = \frac{m_0}{l} \cdot N \bar{v}_x^2. \quad (1.6)$$

Deoarece mișcarea moleculelor este haotică, deci toate direcțiile sînt echivalente, valorile medii ale pătratelor proiecțiilor vitezelor pe direcțiile x , y și z sînt egale, adică $\bar{v}_x^2 = \bar{v}_y^2 = \bar{v}_z^2$. Așa cum $\bar{v}^2 = \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2$, obținem $\bar{v}^2 = 3\bar{v}_x^2$ și $\bar{v}_x^2 = \frac{\bar{v}^2}{3}$. Așadar, forța medie care acționează pe oricare dintre pereții recipientului este aceeași și are valoarea:

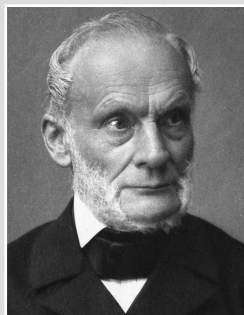
$$F = \frac{m_0}{l} N \frac{\bar{v}^2}{3}. \quad (1.7)$$

Conform definiției, presiunea este dată de relația $p = F/S$.

Folosind (1.7) și luînd în considerare că $S = l^2$, avem:

$$p = \frac{1}{3} \cdot \frac{Nm_0 \bar{v}^2}{l^3} = \frac{1}{3} \cdot \frac{Nm_0 \bar{v}^2}{V} = \frac{1}{3} nm_0 \bar{v}^2, \quad (1.8)$$

unde $l^3 = V$ este volumul recipientului, iar $n = \frac{N}{V}$ reprezintă numărul de molecule din unitatea de volum sau concentrația lor. Mărima $v_T = \sqrt{\bar{v}^2}$ este numită **viteză pătratică medie** sau **viteză termică** și poate fi determinată experimental.



Este unul dintre fondatorii termodinamicii și ai teoriei cinetice a gazelor. A formulat principiul II al termodinamicii și a introdus noțiunea de entropie. A demonstrat că variația entropiei este întotdeauna pozitivă și determină sensul în care decurg procesele. A elaborat teoria mașinilor cu abur și a indicat modalitățile de majorare a randamentului lor. A introdus în teoria cinetică a gazelor metoda statistică de studiu, a formulat noțiunile de sferă de acțiune moleculară, de parcurs liber mediu ș.a. Pentru prima dată a calculat valoarea presiunii gazului asupra pereților vasului în care el se află. A dezvoltat teoria termoelectricității și a introdus noțiunea de disociere electrolitică. A elaborat teoria polarizării dielectricilor.

Observăm că $\frac{m_0 \bar{v}^2}{2} = \bar{\epsilon}_{tr}$ este **energia cinetică medie** a unei molecule în mișcarea ei de translație.

Ecuția (1.8) se mai poate formula:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\epsilon}_{tr}. \quad (1.9)$$

Această expresie a fost obținută pentru prima dată de fizicianul german Rudolf Clausius și este numită **formula fundamentală a teoriei cinetico-moleculare a gazelor ideale**.

Ea arată că:

Presiunea unui gaz este direct proporțională cu energia cinetică a mișcării de translație a tuturor moleculelor din unitatea de volum.

Așadar, presiunea unui gaz, ca un parametru macroscopic, reprezintă rezultatul acțiunii unei forțe medii exercitate de toate moleculele gazului asupra unității de suprafață a peretelui incintei, în care acesta se află.

Problemă rezolvată

1

Se dă:

$$V = 1 \text{ L},$$

$$m = 100 \text{ g},$$

$$M = 4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}},$$

$$p_0 = 10^5 \text{ Pa}$$

$$a) \bar{\epsilon}_{tr} - ?; b) \bar{E}_{tr} - ?$$

SI:

$$10^{-3} \text{ m}^3,$$

$$10^{-1} \text{ kg}$$

J

Într-un balon cu volumul $V = 1 \text{ L}$ se află 100 g de heliu la presiunea atmosferică normală. Determinați:

a) energia cinetică medie a unei molecule de heliu în aceste condiții;

b) energia cinetică medie a tuturor moleculelor din balon.

Rezolvare

a) În conformitate cu formula fundamentală a teoriei cinetico-moleculare (1.9), energia cinetică medie a unei molecule

$$\bar{\epsilon}_{tr} = \frac{3p_0}{2n} = \frac{3p_0 V}{2N}.$$

Din definiția cantității de substanță (1.3) pentru numărul de molecule din balon avem $N = \frac{m}{M} N_A$, iar pentru energia cinetică medie a unei molecule de heliu obținem:

$$\bar{\epsilon}_{tr} = \frac{3Mp_0V}{2mN_A}; \bar{\epsilon}_{tr} \approx 1 \cdot 10^{-23} \text{ J.}$$

b) Energia cinetică medie a tuturor moleculelor din balon este egală cu produsul dintre energia medie a unei molecule și numărul acestora:

$$\bar{E}_{tr} = N \cdot \bar{\epsilon}_{tr} = \frac{3}{2} p_0 V; \bar{E}_{tr} \approx 150 \text{ J.}$$

Problemă rezolvată

2

Se dă:

$p = 700 \text{ kPa},$
 $n = 3,01 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3},$
 $M = 28 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$

SI:

$7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

$v - ?$

m/s

Un flux de molecule de azot este direcționat perpendicular pe suprafața unui perete. Care este viteza acestor molecule, dacă ele exercită asupra peretelui o presiune de 700 kPa, iar concentrația lor este $n = 3,01 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$. Se va considera că fluxul de molecule reprezintă un gaz ideal.

Rezolvare

Presiunea exercitată de moleculele care ciocnesc suprafața S a peretelui

$$p = \frac{F}{S} = \frac{N \cdot F_1}{S},$$

unde F_1 reprezintă forța ce acționează din partea unei molecule care ajunge la suprafața cercetată, iar N – numărul acestor molecule.

Mișcarea moleculelor unui gaz ideal se realizează în conformitate cu legile mecanicii clasice. Conform legii a doua a lui Newton, impulsul forței F_1 a unei molecule este egal cu variația impulsului acesteia:

$$F_1 \Delta t = \Delta(m_0 v) = 2m_0 v,$$

unde m_0 reprezintă masa unei molecule, care, conform (1.2), se exprimă prin masa molară M și numărul lui Avogadro $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, $m_0 = M/N_A$.

În intervalul de timp Δt , la suprafața cercetată vor ajunge moleculele care se află la o distanță mai mică sau egală cu $v\Delta t$. Astfel, numărul de molecule

$$N = nSv \cdot \Delta t.$$

Presiunea exercitată de fluxul de molecule reprezintă

$$p = \frac{nSv\Delta t \cdot 2m_0 v}{S\Delta t} = 2nm_0 v^2 = \frac{2nMv^2}{N_A},$$

de unde pentru viteză obținem:

$$v = \sqrt{\frac{pN_A}{2nM}} = \sqrt{\frac{7 \cdot 10^5 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{2 \cdot 3,01 \cdot 10^{25} \cdot 28 \cdot 10^{-3}}} = 500 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

1. Descrieți modelul gazului ideal. Numiți condițiile în care acest model este valabil.
2. Care este formula fundamentală a teoriei cinetico-moleculare a gazului ideal?
3. Cum se definește viteza pătratică medie a moleculelor unui gaz?
4. Care este viteza termică a moleculelor unui gaz cu masa de 3 kg, ce ocupă volumul $V = 5 \text{ m}^3$ la presiunea $p = 5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$.
5. Calculați numărul moleculelor de oxigen din 1 cm^3 , dacă presiunea oxigenului este de 10^3 Pa , iar viteza medie pătratică a moleculelor este de 500 m/s .
6. Într-o incintă cu volumul de 2 L se află un gaz ideal la presiune atmosferică normală. Care este energia cinetică medie a mișcării de translație a moleculelor acestui gaz?
7. La ce presiune se află hidrogenul dintr-un recipient, dacă concentrația moleculelor este de 10^{26} m^{-3} , iar viteza lor termică $v_T = 600 \text{ m/s}$?
- 8.* În calea unui flux de molecule de hidrogen se află un disc cu suprafața de $6,02 \text{ cm}^2$. Determinați forța care acționează asupra discului, dacă viteza moleculelor este egală cu 1000 m/s , iar concentrația lor – cu 10^{20} m^{-3} .

1.6

TEMPERATURA.

SCĂRI DE TEMPERATURĂ

Experimental se constată că starea de încălzire a unui gaz este determinată de mișcarea de agitație termică a moleculelor lui. În urma ciocnirilor dintre ele se stabilește o stare de echilibru, în care numărul moleculelor cu valorile vitezelor cuprinse într-un anumit interval este constant. Această stare este caracterizată de un alt parametru macroscopic foarte important, numit **temperatură**.

Din punctul de vedere al teoriei cinetico-moleculare, temperatura gazului este o proprietate a sistemului de molecule și deci trebuie să depindă de anumite mărimi microscopice. Într-adevăr, admitem două gaze aflate în diferite stări de încălzire, adică la diferite temperaturi. Aceasta înseamnă că energiile cinetice medii ale moleculelor fiecărui gaz sînt și ele diferite $\bar{\epsilon}_{tr,1} > \bar{\epsilon}_{tr,2}$. Dacă aducem în contact aceste două gaze, atunci moleculele lor se vor ciocni între ele. În urma acestor ciocniri, moleculele primului gaz, avînd viteze mai mari, vor accelera moleculele gazului al doilea, transmitîndu-le o parte din energia lor cinetică. Transferul de energie de la moleculele primului gaz la cele din gazul al doilea va continua pînă cînd energiile cinetice medii ale moleculelor celor două gaze se vor egala. La acest moment gazele sînt în echilibru și au aceeași stare de încălzire, adică aceeași temperatură și aceeași energie cinetică medie a moleculelor ambelor gaze $\bar{\epsilon}_{tr,1} = \bar{\epsilon}_{tr,2}$. Din analiza făcută mai sus rezultă că temperatura și energia cinetică medie a moleculelor gazului au același comportament și între aceste două mărimi trebuie să existe o dependență directă.

Temperatura unui gaz ideal este o măsură a mișcării dezordonate a moleculelor lui.

Rezultă că temperatura nu poate fi micșorată oricît, ci numai pînă cînd va „înceta” mișcarea de agitație termică a moleculelor. Această temperatură este cea mai scăzută temperatură posibilă și se numește **zero absolut**.

În anul 1848, fizicianul englez William Thomson (lord Kelvin) (1824–1907) a introdus în fizică **scara termodinamică** a temperaturilor, numită și **scara Kelvin**. Temperatura măsurată de la zero absolut se numește **temperatură termodinamică** sau **temperatură absolută**. Ea se notează cu T și se exprimă în kelvini. Kelvinul se notează cu simbolul K și este una dintre unitățile fundamentale ale SI. Temperatura măsurată pe scara Kelvin are numai valori pozitive.

Pentru măsurarea temperaturii mai sînt folosite și alte scări. Cele mai cunoscute dintre ele sînt scările Celsius și Fahrenheit.

Scara Celsius este construită în baza a două puncte de reper. Temperatura măsurată pe această scară se notează cu simbolul $^{\circ}\text{C}$. Primul punct de reper, considerat în mod convențional 0°C , reprezintă temperatura stării de echilibru dintre apa pură și gheața care se topește la presiunea atmosferică normală $p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Al doilea punct de reper reprezintă temperatura stării de fierbere a apei pure la aceeași presiune și tot în mod convențional este considerată egală cu 100°C . Intervalul obținut este împărțit în 100 de părți egale și de aceea scara Celsius reprezintă o scară **centigradă**.

După cum vom vedea în par. 1.8, d , temperaturii de zero absolut pe scara Kelvin îi corespunde valoarea de $-273,15^{\circ}\text{C}$. Întrucît scara Kelvin este tot centigradă, legătura dintre scările de temperatură Celsius și Kelvin se determină cu relațiile

$$t(^{\circ}\text{C}) = T - 273, \quad T = t(^{\circ}\text{C}) + 273. \quad (1.10)$$

O altă scară de temperaturi utilizată doar în SUA și numai în scopuri nonștiințifice este scara Fahrenheit. Gradul Fahrenheit este notat cu simbolul $^{\circ}\text{F}$. Pe această scară temperatura stării de echilibru dintre apa pură și gheața care se topește este luată egală cu 32°F , iar cea a stării de fierbere a apei pure – cu 212°F . Intervalul respectiv este împărțit în 180 de părți egale. Astfel, gradul pe scara Fahrenheit este mai mic decît gradul pe scara Celsius de $180/100 = 9/5$ ori. Deoarece temperaturii de 0°C pe scara Celsius îi corespunde temperatura de 32°F pe scara Fahrenheit, legătura dintre aceste scări se determină cu relațiile

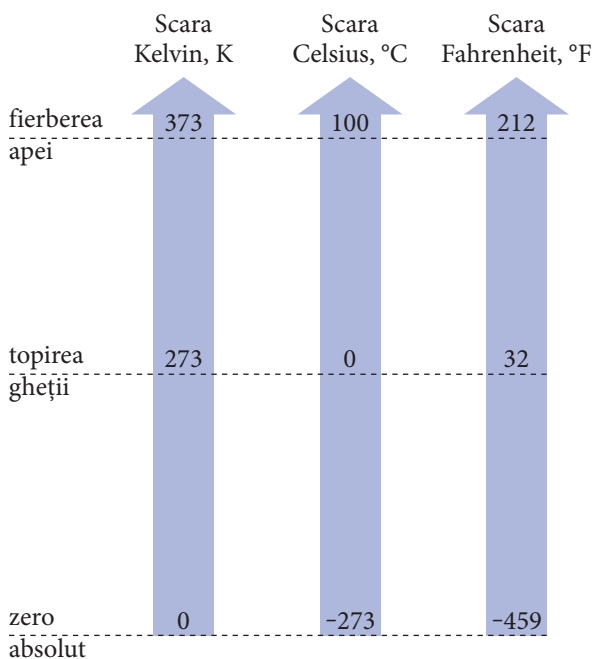


Fig. 1.6

$$t(^{\circ}\text{C}) = \frac{5}{9} (T_{\text{F}} - 32), \quad T_{\text{F}} = \frac{9}{5} t(^{\circ}\text{C}) + 32. \quad (1.11)$$

În figura 1.6 sînt reprezentate schematic scările de temperatură analizate și punctele de reper folosite la definirea lor.

1. Care este interpretarea cinetico-moleculară a temperaturii? Este oare valabilă noțiunea de temperatură pentru o singură moleculă?
2. De ce temperatura termodinamică nu poate fi negativă?
3. Ce reprezintă scara termodinamică a temperaturilor?
4. Cum sînt construite scările de temperaturi Celsius și Fahrenheit?
5. Care sînt unitățile de temperatură pe scările Kelvin, Celsius și Fahrenheit? Care dintre ele este folosită în SI?
6. La ce temperatură indicațiile de pe scările Celsius și Fahrenheit vor coincide? Dar de pe scările Kelvin și Fahrenheit?
7. Într-o zi toridă de vară temperatura aerului este de 95°F. Care este temperatura în această zi pe scara Celsius?

17 ECUAȚIA DE STARE A GAZULUI IDEAL

Din interpretarea cinetico-moleculară a temperaturii rezultă că energia cinetică medie a moleculelor gazului și temperatura lui absolută au același comportament și, prin urmare, trebuie să se exprime una prin alta. Fizicianul austriac Ludwig Boltzmann (1844–1906) a fost primul care a demonstrat că

energia cinetică medie a mișcării de translație a moleculelor unui gaz ideal este direct proporțională cu temperatura absolută și depinde numai de ea:

$$\bar{\epsilon}_{tr} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (1.12)$$

unde $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$ este o constantă universală numită **constanta lui Boltzmann**. Vom menționa în mod special că deși ecuația (1.12) a fost obținută pentru un gaz ideal, ea este valabilă atît pentru gazele reale, cît și pentru lichide și solide.

Întrucît presiunea gazului depinde de energia cinetică medie a mișcării de translație a moleculelor, ea trebuie să depindă și de temperatură. Într-adevăr, introducînd (1.12) în (1.9), obținem relația dintre presiune și temperatură:

$$p = nkT. \quad (1.13)$$

Această relație permite determinarea concentrației de molecule a oricărui gaz ideal dacă se cunosc parametrii lui macroscopici, presiunea și temperatura. Întrucît relația (1.13) nu depinde de natura gazului, pentru toate gazele ideale aflate în condiții normale (presiunea atmosferică normală $p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ și temperatura $t = 0^\circ\text{C}$ sau $T = 273 \text{ K}$) concentrația moleculelor este una și aceeași. Valoarea acestei concentrații se numește **numărul lui Loschmidt**.

Relația care exprimă dependența funcțională numai a parametrilor macroscopici (în cazul unui gaz ideal aceștia sînt presiunea, volumul și temperatura) este numită **ecuație de stare a gazului ideal**. Luînd în considerare că numărul de molecule din unitatea de volum (concentrația) $n = \frac{N}{V}$, din (1.13) obținem:

$$pV = NkT. \quad (1.14)$$

Numărul de molecule din masa de gaz cercetată poate fi determinat din definiția cantității de substanță (1.3). Avem:

$$N = \frac{m}{M} N_A = \nu N_A. \quad (1.15)$$

Introducând (1.15) în (1.14), obținem:

$$pV = \nu N_A kT = \frac{m}{M} N_A kT.$$

Observăm că produsul $R = N_A \cdot k = 6,023 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} = 8,31 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ este o constantă numită **constantă universală a gazelor**. După cum vom vedea în par. 1.8, e , această constantă se determină și experimental.

Așadar, ecuația de stare a gazului ideal capătă forma

$$pV = \nu RT = \frac{m}{M} RT. \quad (1.16)$$

Ea exprimă legătura dintre parametrii macroscopici ai unei mase de gaz date.

Din relația (1.12) rezultă că odată cu creșterea temperaturii crește și agitația termică a moleculelor gazului. Mișcarea de agitație termică poate fi descrisă cantitativ cu ajutorul vitezei termice. Folosind definiția acesteia și (1.12), obținem:

$$v_T = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$$

Deoarece $m_0 = \frac{M}{N_A}$, iar $kN_A = R$, avem:

$$v_T = \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \quad (1.17)$$

Pentru un gaz ideal dat viteza termică este proporțională cu rădăcina pătrată din temperatura absolută și depinde numai de ea.

La echilibrul termic al unui amestec de gaze se egalează temperaturile acestora, adică se egalează energiile cinetice medii ale mișcării de translație a moleculelor, vitezele lor fiind diferite: cele cu mase mai mari au viteze mai mici și invers. De exemplu, la temperatura de 300 K, din (1.17) pentru viteza moleculelor de oxigen obținem aproximativ 483 m/s, iar pentru cele de heliu – aproximativ 1 368 m/s.

Problemă rezolvată

1

Se dă:

$$p = 10^5 \text{ Pa},$$

$$v_T = 2\,000 \text{ m/s}$$

$n - ?$

Să se determine concentrația moleculelor de heliu dintr-o incintă, dacă gazul se află sub presiunea $p = 10^5 \text{ Pa}$, iar viteza termică a moleculelor este $v_T = 2\,000 \text{ m/s}$.

Rezolvare

Din ecuația (1.8), pentru concentrația moleculelor avem: $n = \frac{3p}{m_0 v_T^2}.$

Deoarece $m_0 = M/N_A$ ($M_{\text{He}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$, $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$), obținem:

$$n = \frac{3pN_A}{Mv_T^2}; n = 1,13 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}.$$

Problemă rezolvată

2

Se dă:

$$\begin{aligned} t_1 &= 27^\circ\text{C}, \\ \frac{\Delta m}{m_1} &= 0,4, \\ \Delta t &= 50^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SI:} \\ 300 \text{ K} \\ 50 \text{ K} \end{aligned}$$

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

Într-un recipient se află un gaz ideal la temperatura de 27°C . În urma evacuării din recipient a 40% din masa gazului, temperatura lui a scăzut cu 50°C . De câte ori s-a micșorat presiunea gazului?

Rezolvare

În conformitate cu ecuația de stare a gazului ideal (1.16) pentru cele două stări ale gazului pînă și după evacuare, avem:

$$p_1 V = \frac{m_1}{M} RT_1, \quad p_2 V = \frac{m_2}{M} RT_2.$$

Împărțind prima ecuație la cea de-a doua, obținem:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{T_1}{T_2}.$$

Deoarece temperatura gazului s-a micșorat cu $\Delta t = \Delta T$, rezultă că $T_2 = T_1 - \Delta T$. Din condițiile problemei este cunoscută micșorarea relativă a masei gazului, adică

$$\frac{\Delta m}{m_1} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} = 1 - \frac{m_2}{m_1},$$

de unde

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta m}{m_1}}.$$

Așadar, pentru raportul presiunilor pînă și după evacuarea gazului din recipient, avem:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{\left(1 - \frac{\Delta m}{m_1}\right)(T_1 - \Delta T)} = \frac{300}{(1 - 0,4)(300 - 50)} = 2.$$

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Care este relația dintre energia cinetică medie a mișcării de translație a moleculelor și temperatură?
2. Ce reprezintă ecuația de stare a gazului ideal? Scrieți această ecuație.
3. Cum depinde viteza termică a moleculelor de natura gazului?
4. Calculați concentrația unui gaz aflat în condiții normale (numărul Loschmidt).
5. Determinați temperatura unui gaz, dacă energia cinetică medie a mișcării de translație a moleculelor lui este egală cu $4,14 \cdot 10^{-20} \text{ J}$.

6. Viteza termică a moleculelor unui gaz la 0°C este egală cu 493 m/s . Care este masa molară a acestui gaz?
7. Determinați densitatea unui gaz cu presiunea $p = 5 \cdot 10^5\text{ Pa}$, dacă viteza termică a moleculelor lui este de 600 m/s .

1.8

TRANSFORMĂRI SIMPLE ALE GAZULUI IDEAL

Studiul legităților după care variază parametrii de stare în procesele termice a fost efectuat mai întâi experimental. Dacă unul dintre parametrii de stare p , V , t se menține constant, transformările sînt **simple**: **izoterme** ($t = \text{const.}$); **izobare** ($p = \text{const.}$) și **izocore** ($V = \text{const.}$).

a. Legea transformării izoterme

Transformarea unui gaz menținut la temperatură constantă poate fi cercetată cu ajutorul dispozitivului prezentat schematic în *figura 1.7*. El este compus dintr-un vas gofrat (1), al cărui capac este unit cu o tijă (2) prevăzută cu filet. Pe partea laterală a dispozitivului este fixată o riglă gradată (3) cu care se măsoară volumul vasului în unități relative. Presiunea gazului se măsoară cu manometrul (4) prin intermediul tubului de legătură (5). Gazul de studiat se introduce în dispozitiv printr-un tub prevăzut cu robinetul (6). Deschizînd acest robinet, în vas se acumulează o masă anumită de gaz (aer), care ocupă volumul $V_1 = V_{\text{max}}$ la presiune atmosferică normală $p_1 = p_0 = 10^5\text{ Pa}$. După închiderea robinetului, masa de gaz studiată rămîne constantă.

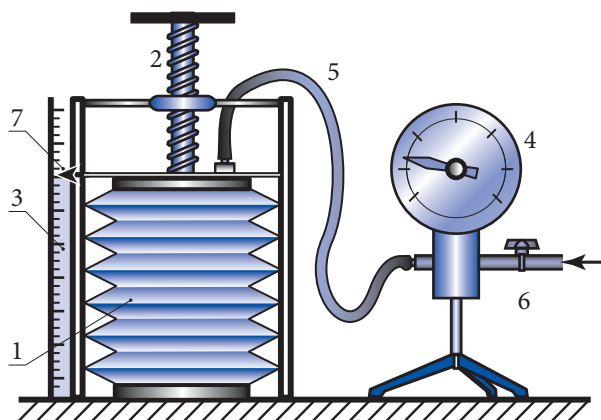


Fig. 1.7

Dacă menținem dispozitivul la aceeași temperatură ($t = \text{const.}$), vom observa că prin rotirea tijei cu filet odată cu comprimarea gazului presiunea acestuia crește; la destinderea gazului, presiunea se micșorează. În timpul comprimării gazului, notînd volumul pentru trei poziții diferite ale indicatorului (7) al vasului gofrat și presiunea corespunzătoare indicată de manometru, vom constata că de fiecare dată produsul dintre presiune și volum este aproximativ același:

$$p_1 V_1 \approx p_2 V_2 \approx p_3 V_3.$$

Acest rezultat a fost obținut pentru prima dată în anul 1662 de fizicianul și chimistul englez Robert Boyle și, independent de acesta, de către savantul francez Edme Mariotte (1620–1684) în anul 1676.

Într-o transformare izotermă ($t = \text{const.}$) a unei mase date de gaz ($m = \text{const.}$), produsul dintre presiunea și volumul lui este constant.

$$pV = \text{const.}, \text{ pentru } t = \text{const.}, m = \text{const.} \quad (1.18)$$

Dependența dintre presiunea și volumul unei mase de gaz la temperatură constantă poate fi reprezentată grafic în coordonatele p, V printr-o hiperbolă echilaterală numită **izotermă**. În figura 1.8 este reprezentată o „familie” de izoterme caracteristice unei anumite mase de gaz supuse unor transformări izoterme la temperaturile $t_1 < t_2 < t_3$. Cu cât temperatura este mai înaltă, cu atât izoterma este mai îndepărtată de axele de coordonate.

Legea Boyle–Mariotte se verifică experimental numai în cazul presiunilor relativ mici. Experiența arată că la presiuni mari gazul se comprimă mai puțin decât arată legea. Aceasta se explică prin faptul că la presiuni mari se micșorează volumul ocupat de gaz, dar nu și volumul propriu al moleculelor. Din această cauză, când presiunea gazului crește nelimitat, volumul lui nu tinde către zero, după cum rezultă din (1.18). Un gaz care s-ar supune legii Boyle–Mariotte pentru orice valori ale presiunii și volumului ar trebui să aibă proprietățile enunțate în modelul gazului ideal. Un astfel de gaz ipotetic mai este numit **gaz perfect** sau **ideal**. El nu există în realitate, însă gazele reale în condiții obișnuite se comportă, efectiv, ca un gaz ideal, dacă presiunea nu depășește valoarea $\sim 10^7 \text{ Pa} = 100 p_0$ și temperatura este mult mai mare decât cea de lichefiere.

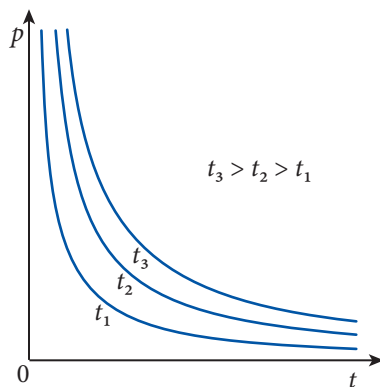


Fig. 1.8

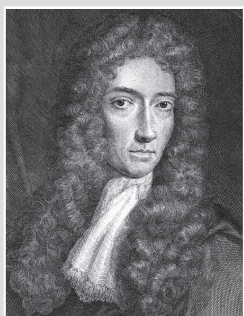
Lucrare de laborator

VERIFICAREA EXPERIMENTALĂ A LEGII BOYLE–MARIOTTE

Scopul lucrării:	Determinarea experimentală a presiunii unei mase date de gaz și verificarea legii Boyle–Mariotte.
Aparate și materiale necesare:	un tub de sticlă închis la un capăt cu lungimea de 60–70 cm și diametrul de 8–10 mm; un vas transparent de formă cilindrică cu înălțimea de 40–60 cm; un barometru pentru determinarea presiunii atmosferice; o riglă cu diviziuni milimetrice.

Considerații teoretice

În această lucrare de laborator se studiază o masă dată de aer, considerat gaz ideal, ce se află în interiorul unui tub de sticlă cu lungimea l și aria secțiunii S . Dacă tubul se introduce cu deschizătura în jos într-un vas cu apă, atunci lungimea coloanei de aer din el se micșorează cu valoarea h a înălțimii coloanei de apă care intră în tub (fig. 1.9). Din (1.18) și cele menționate mai sus obținem $p_0 S l = p(l-h) S$ sau $p_0 l = p(l-h)$, unde p_0 este presiunea atmosferică, iar p reprezintă presiunea aerului din tub.



A activat în diverse domenii ale fizicii: fizica moleculară, optică, electricitate, hidrostatică, acustică ș.a. A construit primul barometru. A studiat elasticitatea corpurilor solide, a formulat ipoteza structurii compuse a luminii albe și a cercetat posibilitatea electrizării prin influență. În 1663, a descoperit inelele colorate în pelicule subțiri, numite mai târziu „inelele lui Newton”. A perfecționat pompa cu aer inventată de Guericke și cu ajutorul ei a cercetat proprietățile elastice ale aerului, demonstrând elasticitatea lui. A determinat greutatea specifică a aerului și a măsurat gradul de rarefiere a acestuia. A demonstrat că ridicarea lichidului în tuburile capilare nu este legată de presiunea atmosferică.

Presiunea p se determină prin măsurarea diferenței de niveluri $H - h$ ale apei din vas și, respectiv, din tub (fig. 1.9). Într-adevăr, presiunea din punctul A de la capătul inferior al tubului $p_A = p + \rho gh$, iar pentru presiunea din punctul B la același nivel în vas $p_B = p_0 + \rho gH$. Egalând presiunile $p_A = p_B$, exprimăm presiunea aerului închis în tub:

$$p = p_0 + \rho g (H - h), \quad (1.19)$$

unde ρ este densitatea apei, iar g – accelerația gravitațională.

Modul de lucru:

1. Măsurăți presiunea atmosferică p_0 cu ajutorul barometrului.
2. Măsurăți lungimea tubului de sticlă l .
3. Determinați produsul $p_0 l$ dintre presiune și lungimea coloanei de aer în starea inițială.
4. Introduceți în vasul cu apă tubul de sticlă cu capătul deschis în jos.
5. Măsurăți înălțimea coloanei de apă din tub și determinați lungimea coloanei de aer $l - h$ în starea finală.
6. Măsurăți diferența dintre nivelurile de apă din vas și din tub și cu ajutorul relației (1.19) determinați presiunea aerului din tub în starea finală.
7. Determinați produsul $p(l - h)$ dintre presiune și lungimea coloanei de aer în starea finală.
8. Comparați valorile produselor $p_0 l$ și $p(l - h)$ și observați egalitatea aproximativă a lor, verificând astfel legea Boyle–Mariotte.
9. Repetați de 2-3 ori măsurările și determinările din pct. 4–8 și introduceți rezultatele obținute în următorul tabel:

Nr. crt.	p_0 (kPa)	l (m)	h (m)	$l - h$ (m)	$H - h$ (m)	p (kPa)	$p_0 l$	$p(l - h)$
1.								
2.								
3.								

10. Repetați concluziile referitor la rezultatele obținute.

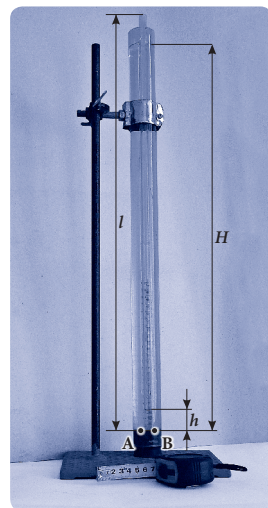


Fig. 1.9

1. Un elev a efectuat experiența pentru verificarea legii Boyle–Mariotte introducând tubul de sticlă în apă fierbinte. Va obține oare elevul rezultate ce confirmă această lege? Explicați de ce.
2. Explicați cum se determină presiunea aerului închis în tubul de sticlă.

b. Legea transformării izobare

Să cercetăm procesul dilatării unei mase de gaz ($m = \text{const.}$) aflat la presiune constantă. În acest scop, se ia un balon de sticlă B , în care se află gazul studiat (de exemplu, aer), și se astupă cu un dop de plută, prin care este trecut un tub de sticlă S , îndoit sub un unghi drept (fig. 1.10). În partea orizontală a tubului se află o picătură de lichid colorat care separă gazul de mediul înconjurător. Inițial, balonul este introdus într-un vas ce conține apă cu gheață ($t = 0^\circ\text{C}$). Volumul la această temperatură este V_0 . Scara gradată alăturată părții orizontale a tubului S permite determinarea volumului V ocupat de gazul închis în balon la temperatura t indicată de termometrul T . Încălzind apa din vas cu ajutorul unei spirale prin care circulă curent electric, observăm deplasarea picăturii de lichid colorat.

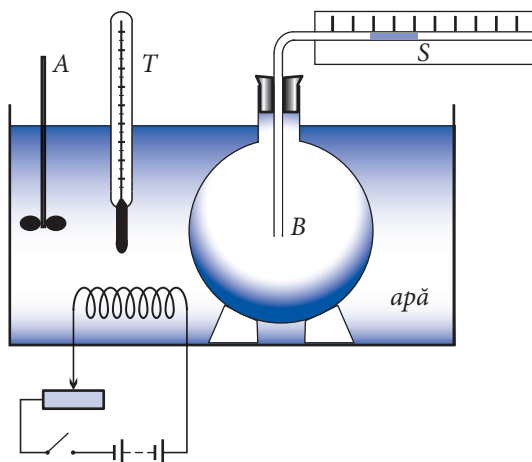


Fig. 1.10

Pentru a asigura o încălzire uniformă a conținutului vasului, apa se amestecă cu agitatorul A . Astfel, pentru diferite temperaturi, de fiecare dată se determină variația absolută a volumului de gaz $\Delta V = V - V_0$ sau cea relativă $\Delta V/V_0$, care arată ce parte din variația absolută ΔV revine unității de volum. Deoarece picătura de lichid din tubul orizontal în timpul încălzirii se află în echilibru, presiunea gazului studiat rămâne mereu constantă și egală cu cea atmosferică.

Experimentând cu mase de gaze diferite, fizicianul și chimistul francez Louis Joseph Gay-Lussac a stabilit în anul 1802 următoarea lege:

Variația relativă a volumului unei mase de gaz ($m = \text{const.}$) la presiune constantă este direct proporțională cu variația temperaturii și nu depinde de natura gazului.

$$\frac{V - V_0}{V_0} = \alpha t, \text{ pentru } m = \text{const.}, p = \text{const.} \quad (1.20)$$

Coeficientul de proporționalitate α se numește **coeficient de dilatare izobară**. S-a luat în considerare că variația temperaturii începe de la $t_0 = 0$, $\Delta t = t - t_0 = t$. După cum rezultă din (1.20), acest coeficient este numeric egal cu variația relativă a volumului de gaz la încălzirea lui cu 1 grad. Măsurătorile exacte ale coeficientului α au stabilit aceeași valoare pentru toate gazele:

$$\alpha = 0,00366 \text{ grad}^{-1} = \frac{1}{273,15} \text{ grad}^{-1}.$$



A cercetat fenomenele termice și problemele fizicii moleculare. În timpul zborurilor cu aerostatul, a studiat temperatura și umiditatea aerului, stabilind că temperatura aerului se micșorează la destindere și se mărește la comprimarea lui. Studiază comportarea gazului într-un sistem izolat de exterior, fenomenul dilatării gazelor și proprietățile acestora. A elaborat metoda determinării densității vaporilor și a cercetat elasticitatea lor. A demonstrat egalitatea coeficientului dilatării termice a tuturor gazelor.

Din (1.20) pentru volumul gazului aflat la temperatura t putem scrie:

$$V = V_0 (1 + \alpha t). \quad (1.21)$$

Volumul unui gaz aflat la presiune constantă crește liniar cu temperatura.

Transformarea izobară poate fi reprezentată grafic. În coordonatele V, t ecuația (1.21) este reprezentată printr-o dreaptă numită **izobară**, care intersectează axa volumelor într-un punct cu coordonatele $(V_0, 0)$. În figura 1.11 sînt reprezentate izobarele obținute pentru o masă dată de gaz la diferite presiuni. După cum se vede din figură, ele au înclinări diferite, însă prelungirile lor intersectează axa temperaturilor în unul și același punct cu coordonatele $(0, -1/\alpha)$.

Menționăm că legea lui Gay-Lussac nu este valabilă pentru temperaturi joase (partea cu linii întrerupte a izobarelor din fig. 1.11), la care substanța se află în stare lichidă sau solidă.

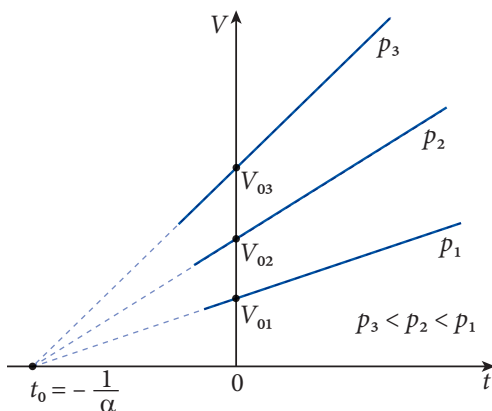


Fig. 1.11

c. Legea transformării izocore

Legea variației presiunii gazelor la volum constant poate fi stabilită cu ajutorul dispozitivului descris în figura 1.7. În acest scop, fixăm un anumit volum al vasului gofrat, în care se află gazul studiat, și introducem dispozitivul într-un vas ce conține apă cu gheață la temperatura $t_0 = 0^\circ\text{C}$. Presiunea gazului p_0 la această temperatură este indicată de manometru. Menținând volumul fixat anterior, variem temperatura gazului, încălzind apa cu gheață din vas. Notînd indicațiile manometrului pentru cîteva valori ale temperaturii, constatăm că variația presiunii gazului studiat este direct proporțională cu temperatura.

Experimentînd cu mase de gaze diferite, fizicianul francez J.A. Charles (1746–1832) descoperă în anul 1787 legea care-i poartă numele:

La încălzirea izocoră a unei mase date de gaz ($m = \text{const.}$), variația relativă a presiunii lui este direct proporțională cu variația temperaturii și nu depinde de natura gazului:

$$\frac{p - p_0}{p_0} = \beta t, \text{ pentru } m = \text{const.}, V = \text{const.} \quad (1.22)$$

Coeficientul de proporționalitate β se numește **coeficient termic al presiunii** și este egal numeric cu variația relativă a presiunii gazului la încălzirea lui cu un grad. S-a luat în considerare că variația temperaturii $\Delta t = t - t_0 = t$. Prin măsurări exacte s-a stabilit că pentru toate gazele la temperaturi mult mai ridicate decât cea de lichefiere și la presiuni scăzute valoarea coeficientului β este identică cu cea a coeficientului dilatării izobare α :

$$\beta = \alpha = 0,00366 \text{ grad}^{-1} = \frac{1}{273,15} \text{ grad}^{-1}.$$

Din (1.22) rezultă:

$$p = p_0 (1 + \beta t). \quad (1.23)$$

Presiunea unui gaz menținut la volum constant crește liniar cu temperatura.

În figura 1.12 este reprezentat graficul variației presiunii în funcție de temperatură în coordonatele p și t . Pentru o masă dată de gaz se obțin niște drepte numite **izocore**, care au înclinări diferite, dar prelungirile lor intersectează axa temperaturilor ($p = 0$) în punctul cu coordonatele $(0, -1/\beta)$. Ca și în cazul izobarelor (fig. 1.11), în regiunea temperaturilor scăzute izocorele sînt trasate cu linii întrerupte, deoarece la aceste temperaturi substanța nu se află în stare gazoasă și legea lui Charles (1.23) nu mai este valabilă.

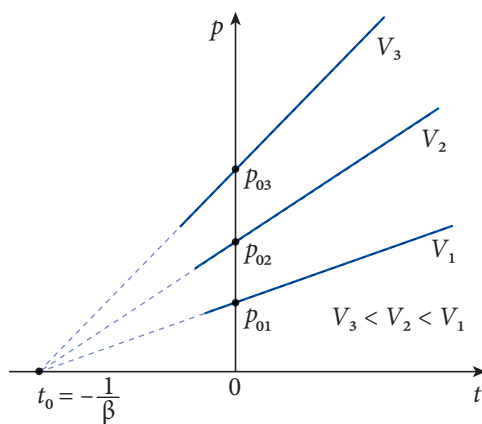


Fig. 1.12

d. Legile Gay-Lussac și Charles exprimate prin temperatura absolută

La studierea legilor lui Gay-Lussac și Charles ați observat că izobarele și izocorele prelungite intersectează axa temperaturilor în același punct, $t_0 = -1/\alpha = -1/\beta$ (fig. 1.11 și 1.12). Pentru a înțelege semnificația acestei temperaturi, vom analiza legile din punct de vedere cinetico-molecular.

Cunoaștem că agitația dezordonată a moleculelor este cu atât mai intensă cu cât temperatura este mai ridicată. Astfel, în cazul unei transformări izocore, odată cu creșterea temperaturii, adică odată cu intensificarea agitației termice, crește și numărul de ciocniri pe unitatea de suprafață a incintei cu gaz în unitatea de timp. Întrucît la fiecare ciocnire moleculele transmit unității de suprafață a incintei un impuls oarecare, iar acest impuls este proporțional cu forța exercitată de molecule, rezultă că va crește și presiunea gazului. Dacă temperatura scade, atunci se micșorează agitația termică și presiunea gazului scade.

La transformarea izobară, micșorarea temperaturii impune micșorarea volumului incintei cu gaz. Într-adevăr, deoarece agitația termică scade, se micșorează și forța ce

acționează pe unitatea de suprafață a incintei, adică presiunea. Întrucât presiunea se menține constantă, este nevoie să micșorăm volumul incintei.

Să examinăm acum un gaz ideal, care rămâne întotdeauna în stare gazoasă. Din analiza cinetico-moleculară a legilor lui Gay-Lussac și Charles rezultă că, la temperatura egală cu zero absolut, volumul în transformarea izobară a gazului ideal și presiunea în cea izocoră devin egale cu zero. Așadar, la această temperatură din ecuațiile (1.21) și (1.23) rezultă:

$$0 = V_0 (1 + \alpha t_0) \text{ și } 0 = p_0 (1 + \beta t_0),$$

de unde obținem:

$$t_0 = -\frac{1}{\alpha} = -\frac{1}{\beta} = -273,15^\circ\text{C}.$$

Din definiția temperaturii absolute dată în par. 1.7 rezultă legătura dintre temperaturile măsurate pe scările Celsius și Kelvin:

$$T = \frac{1}{\alpha} + t = \frac{1}{\beta} + t; \quad (1.24)$$

notînd $T_0 = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\beta} = 273,15 \text{ K}$, obținem:

$$T = 273,15 + t (^\circ\text{C}),$$

ceea ce coincide cu (1.10).

Observăm că scările Kelvin și Celsius sînt deplasate cu T_0 una față de alta (fig. 1.6) și variația temperaturii cu 1K este echivalentă variației acesteia cu 1°C .

Dacă se utilizează scara temperaturilor absolute, atunci ecuația de dilatare a gazelor (1.21) devine foarte simplă. Într-adevăr, din (1.21) cu ajutorul relației (1.24) obținem:

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

de unde $\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0}$.

Așadar, legea lui Gay-Lussac poate fi formulată astfel:

Într-o transformare izobară, pentru o masă de gaz ($m = \text{const.}$) raportul dintre volum și temperatura absolută în orice stare rămîne constant.

$$\frac{V}{T} = \text{const.}, \text{ pentru } m = \text{const.}, p = \text{const.} \quad (1.25)$$

În mod analog se formulează și legea lui Charles:

Într-o transformare izocoră, pentru o masă de gaz ($m = \text{const.}$) raportul dintre presiunea gazului și temperatura absolută în orice stare rămîne constant.

$$\frac{p}{T} = \text{const.}, \text{ pentru } m = \text{const.}, V = \text{const.} \quad (1.26)$$

În coordonatele V, T și p, T , graficele transformărilor izobare și izocore sînt mai simple. Prelungirile lor trec prin origine (fig. 1.13 și, respectiv, fig. 1.14).

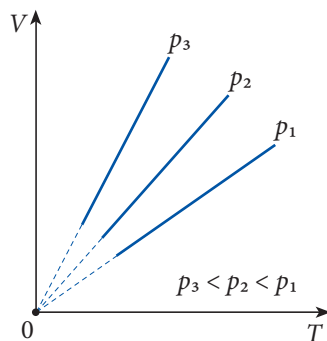


Fig. 1.13

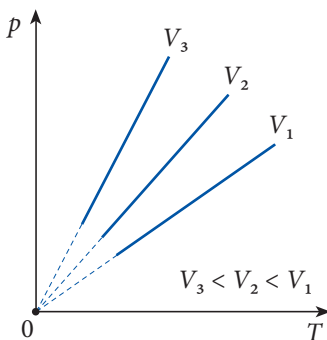


Fig. 1.14

e. Ecuația termică de stare a gazului ideal

În transformările analizate, unul dintre cei trei parametri de stare era menținut constant. În practică însă deseori putem constata că variază concomitent toți parametrii gazului. Relația dintre acești parametri trebuie să fie descrisă printr-o ecuație din care se vor obține toate transformările simple ca niște cazuri particulare.

Să cercetăm un gaz oarecare, aflat în starea 1 descrisă de parametrii p_1 , V_1 și T_1 , pe care dorim să-l aducem în starea 2 caracterizată de parametrii p_2 , V_2 și $T_2 > T_1$ printr-o transformare arbitrară 1-2. În sistemul de coordonate p , V , aceste stări sînt reprezentate prin punctele 1 și 2 (fig. 1.15). Dacă transformarea este de echilibru, atunci ecuația care o descrie nu trebuie să depindă de modul în care se ajunge la starea finală 2. Pentru demonstrarea acestei afirmații, vom efectua transformarea în două moduri: 1-1'-2 prin starea intermediară 1' cu coordonatele p_1 , V' , T_2 și 1-2'-2 prin starea intermediară 2' cu coordonatele p_2 , V'' , T_1 . Transformarea 1-1'-2 poate fi realizată prin succesiunea a două procese simple: mai întîi izobar, apoi izoterm, descrise prin ecuațiile:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V'}{T_2} \quad \text{și} \quad p_1 V' = p_2 V_2.$$

Dacă înlocuim parametrul stării intermediare V' dintr-o ecuație în alta, obținem:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}. \quad (1.27)$$

În transformarea 1-2'-2 gazul este supus unei transformări izoterme, urmată de altă izobară:

$$p_1 V_1 = p_2 V'' \quad \text{și} \quad \frac{V''}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}.$$

Prin excluderea parametrului stării intermediare V'' se obține aceeași ecuație (1.27). Așadar, dacă la transformarea gazului prin două stări intermediare diferite s-a obținut același rezultat, reiese că și prin oricare altă stare intermediară gazul va ajunge în starea 2, ai cărei parametri sînt legați cu cei din starea 1 prin ecuația (1.27).

Acest rezultat a fost obținut pentru prima dată în anul 1834 de fizicianul francez Benoit Clapeyron (1799-1864).

Produsul dintre presiunea și volumul unei mase de gaz date ($m = \text{const.}$), împărțit la temperatura sa absolută, este o mărime constantă:

$$\frac{pV}{T} = \text{const.} \quad (m = \text{const.}). \quad (1.28)$$

Cercetările experimentale de mare precizie au demonstrat că ecuația Clapeyron este valabilă pentru orice gaz, indiferent de natura acestuia, aflat la presiuni de ordinul celei atmosferice (și mai mici) și la temperaturi mult mai ridicate decît cea de lichiefiere a gazului. Gazul aflat în asemenea condiții poate fi aproximat cu un gaz ideal.

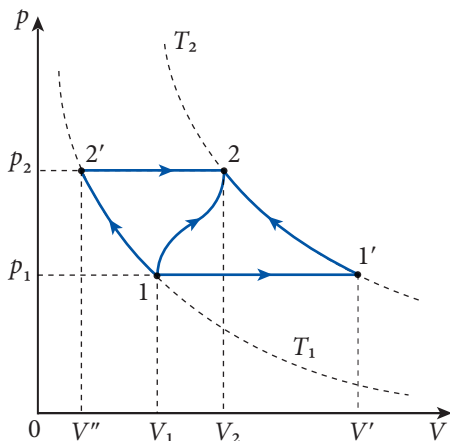


Fig. 1.15

Să revenim la ecuația (1.28) și să examinăm o transformare arbitrară a unui mol de gaz aflat inițial în condiții normale. În acest caz ecuația Clapeyron are forma:

$$\frac{p_0 V_{M0}}{T_0} = \frac{p V_M}{T}.$$

Mărimea din partea stîngă a acestei ecuații este o constantă care nu depinde de natura gazului. Ea se numește **constanta universală a gazelor** și se notează cu litera R . Deoarece în condiții normale $p_0 = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$, $t_0 = 0^\circ\text{C}$, adică $T_0 = 273,15 \text{ K}$, și $V_{M0} = 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$, constanta universală este:

$$R = \frac{1,01325 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 22,41 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}}{273,15 \text{ K}} \approx 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}.$$

Ecuația de stare pentru un mol de gaz devine:

$$p V_M = RT. \quad (1.29)$$

Ecuația (1.29) a fost obținută pentru prima dată de chimistul rus Dmitri Mendeleev (1834–1907), de aceea este numită ecuația Clapeyron–Mendeleev pentru un mol de gaz.

Pentru ν moli de gaz $V = \nu V_M$ și ecuația (1.29) devine:

$$pV = \nu RT.$$

Deoarece $\nu = \frac{m}{M}$, unde m este masa gazului, iar M – masa lui molară, ecuația Clapeyron–Mendeleev ia forma:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (1.30)$$

Ecuația (1.30) rezultă din cercetări experimentale și coincide cu ecuația (1.16) obținută din formula fundamentală a teoriei cinetico-moleculare. Ea exprimă dependența dintre parametrii de stare ai gazului aflat în condiții de echilibru termic, de aceea mai este numită și **ecuație termică de stare a gazelor perfecte**.

Din ecuația Clapeyron–Mendeleev se obțin toate transformările simple studiate anterior. Într-adevăr, considerînd constant unul dintre cei trei parametri de stare, din (1.30) se obține:

$$pV = \text{const.} = \frac{m}{M} RT, \quad (m, T - \text{const.}) - \text{legea Boyle–Mariotte};$$

$$\frac{V}{T} = \text{const.} = \frac{m}{M} R \cdot \frac{1}{p}, \quad (m, p - \text{const.}) - \text{legea lui Gay-Lussac};$$

$$\frac{p}{T} = \text{const.} = \frac{m}{M} R \cdot \frac{1}{V}, \quad (m, V - \text{const.}) - \text{legea lui Charles}.$$

Ecuația de stare permite determinarea densității unui gaz în funcție de presiunea la care se află și de temperatura sa. Folosind definiția densității $\rho = m/V$ și ecuația (1.30), obținem:

$$\rho = \frac{Mp}{RT}. \quad (1.31)$$

Să determinăm presiunea exercitată de un amestec de gaze diferite. Din (1.14) avem:

$$pV = NkT = (N_1 + N_2 + \dots + N_j) kT,$$

unde p este presiunea amestecului de gaze, iar N_1, N_2, \dots, N_j sînt numerele de molecule din componentele 1, 2, ... j ale amestecului. Dacă ținem seama că pentru fiecare

componentă a amestecului $p_j V = N_j kT$, unde p_j este presiunea parțială a componentei j , adică presiunea pe care ar fi avut-o componenta j a gazului în lipsa celorlalte gaze, ocupînd volumul amestecului la temperatura acestuia T , rezultă: $pV = (p_1 + p_2 + \dots p_j) V$ și, simplificînd prin V , obținem:

$$p = p_1 + p_2 + \dots p_j. \quad (1.32)$$

Ecuția (1.32) reprezintă legea lui Dalton pentru un amestec de gaze și a fost obținută mai întîi experimental.

Presiunea unui amestec de gaze este egală cu suma presiunilor parțiale.

Din (1.30) și (1.32) pentru ecuația Clapeyron–Mendeleev în cazul unui amestec de gaze obținem:

$$pV = \left(\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \dots + \frac{m_j}{M_j} \right) RT,$$

unde p este presiunea amestecului.

Problemă rezolvată 1

Se dă:

$$h = 30 \text{ cm},$$

$$L = 1 \text{ m},$$

$$p_1 = 40 \text{ kPa},$$

$$\rho = 13,6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$x - ?$$

SI:

$$0,3 \text{ m},$$

$$4 \cdot 10^4 \text{ Pa}$$

$$\text{m}$$

La mijlocul unui tub de sticlă orizontal, sudat la ambele capete, se află o coloană de mercur cu lungimea $h = 30 \text{ cm}$. Știînd că lungimea tubului este $L = 1 \text{ m}$, iar presiunea gazului din tub este $p_1 = 40 \text{ kPa}$, determinați cu cît va coborî coloana de mercur cînd tubul va fi așezat în poziție verticală. Densitatea mercurului $\rho = 13,6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Rezolvare

În poziție orizontală, gazul aflat în cele două compartimente ale tubului este caracterizat de aceiași parametri:

presiunea p_1 și volumul $V_1 = \frac{L-h}{2} S$, unde S este aria

secțiunii transversale a tubului (fig. 1.16). Cînd tubul este așezat vertical, gazul suferă o transformare izotermă: în

partea de sus prin dilatare pînă la volumul $V_2 = \left(\frac{L-h}{2} + x \right) S$, iar în partea de jos prin compri-

mare pînă la volumul $V_3 = \left(\frac{L-h}{2} - x \right) S$, unde x este distanța cu care se deplasează coloana

de mercur. Presiunile în cele două compartimente devin p_2 și, respectiv, p_3 . Condiția de echilibru a coloanei de mercur este

$$p_3 = p_2 + \rho gh,$$

unde ρ reprezintă densitatea mercurului, iar $g \approx 10 \text{ m/s}^2$ – accelerația gravitațională. Conform legii Boyle–Mariotte, pentru masele de gaz din partea superioară și din cea inferioară ale tubului avem:

$$p_1 \frac{L-h}{2} S = p_2 \left(\frac{L-h}{2} + x \right) S; \quad p_1 \frac{L-h}{2} S = (p_2 + \rho gh) \left(\frac{L-h}{2} - x \right) S.$$

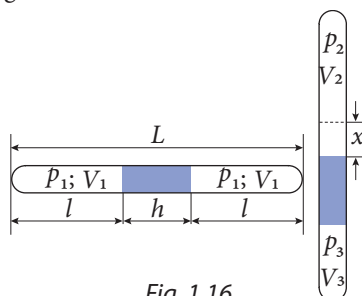


Fig. 1.16

De aici obținem ecuația de gradul doi în x , anume: $x^2 + \frac{p_1(L-h)}{\rho gh}x - \frac{1}{4}(L-h)^2 = 0$ cu soluțiile

$$x_{1,2} = \frac{(L-h)p_1}{2\rho gh} \left[-1 \pm \sqrt{1 + \left(\frac{\rho gh}{p_1} \right)^2} \right].$$

Așa cum x nu poate fi negativ, coloana de mercur coboară cu

$$x = \frac{(L-h)p_1}{2\rho gh} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\rho gh}{p_1} \right)^2} - 1 \right]; x \approx 15 \text{ cm}.$$

Problemă rezolvată

2

Se dă:

$l = 20 \text{ cm},$

$r = 0,5 \text{ cm},$

$t_1 = 100^\circ\text{C},$

$t_2 = 17^\circ\text{C},$

$\rho = 13,6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

$m - ?; \Delta l - ?$

SI:

$0,2 \text{ m},$

$5 \cdot 10^{-3} \text{ m},$

$373 \text{ K},$

290 K

kg; m

Un tub de sticlă închis la un capăt, avînd lungimea $l = 20 \text{ cm}$ și raza $r = 0,5 \text{ cm}$, este încălzit pînă la temperatura de 100°C . Fiind adus în poziție orizontală, capătul deschis se introduce într-o picătură de mercur cu densitatea $\rho = 13,6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. Să se determine masa și lungimea coloanei de mercur care a intrat în tub la răcirea lui pînă la temperatura camerei egală cu 17°C .

Rezolvare

La introducerea capătului deschis al tubului în picătura de mercur, în interiorul lui se închide o masă de aer cu volumul V_1 și temperatura T_1 . Deoarece tubul se află în poziție orizontală, presiunea aerului este aproximativ egală cu cea atmosferică și în decursul răcirii pînă la temperatura camerei rămîne constantă. Astfel, aerul din tub suferă o transformare izobară. Dacă notăm temperatura camerei cu T_2 și volumul aerului din tub la această temperatură cu V_2 (fig. 1.17), atunci din legea lui Gay-Lussac avem:

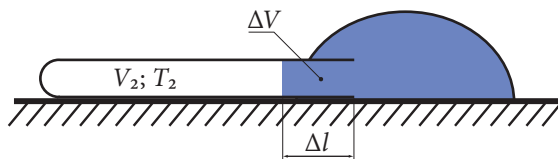


Fig. 1.17

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

Volumul mercurului din tub este $\Delta V = V_1 - V_2 = V_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right)$, de unde $\Delta l = \frac{\Delta V}{S} = l \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right)$; $\Delta l \approx 4 \text{ cm}$.

Din relația de definiție a densității, pentru masa mercurului intrat în tub avem:

$$m = \rho \Delta V = \rho S \Delta l = \pi \rho r^2 \Delta l;$$

$$m \approx 42,7 \cdot 10^{-3} \text{ kg} = 42,7 \text{ g}.$$

Problemă rezolvată

3

Se dă:

$$\begin{aligned} p_1 &= 2,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}, \\ t_1 &= 17^\circ\text{C}, \\ t_2 &= 57^\circ\text{C}, \\ p_0 &= 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

SI:

$$\begin{aligned} 290 \text{ K}, \\ 330 \text{ K} \end{aligned}$$

$$\frac{S_1}{S_2} - ?$$

Presiunea aerului din pneurile unui automobil este $p_1 = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ la temperatura $t_1 = 17^\circ\text{C}$. De câte ori se va micșora suprafața de contact a roților cu drumul, dacă în timpul mișcării temperatura aerului din pneuri s-a mărit până la 57°C ? Se va considera presiunea atmosferică $p_0 = 10^5 \text{ Pa}$, iar variația volumului pneurilor se va neglija.

Rezolvare

În timpul mișcării automobilului, aerul din pneuri suferă o transformare izocoră. Conform legii lui Charles, $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$, unde p_2 este presiunea aerului din pneuri la temperatura $T_2 = 330 \text{ K}$.

Întrucât forța F cu care apasă roțile asupra drumului este aceeași în ambele cazuri (egală cu greutatea automobilului G), fiind determinată de diferența dintre presiunea interioară p și cea exterioară p_0 , din definiția presiunii $p = \frac{F}{S}$ obținem:

$$G = (p_1 - p_0)S_1,$$

$$G = (p_2 - p_0)S_2,$$

unde S_1 și S_2 sînt ariile suprafețelor de contact ale roților cu drumul în cele două cazuri.

Rezultă: $\frac{S_1}{S_2} = \frac{p_2 - p_0}{p_1 - p_0}.$

După substituirea presiunii p_2 din legea lui Charles, pentru raportul $\frac{S_1}{S_2}$ obținem:

$$\frac{S_1}{S_2} \approx \frac{p_1 T_2 - p_0 T_1}{T_1 (p_1 - p_0)}; \frac{S_1}{S_2} \approx 1,23.$$

Problemă rezolvată

4

Se dă:

$$\begin{aligned} t_1 &= 27^\circ\text{C}, \\ p_1 &= p_0 = 10^5 \text{ Pa}, \\ h &= 10 \text{ m}, \\ t_2 &= 4^\circ\text{C}, \\ g &= 10 \text{ m/s}^2, \\ \rho &= 10^3 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

SI:

$$\begin{aligned} 300 \text{ K}, \\ 277 \text{ K} \end{aligned}$$

$$\frac{V_1}{V_2} - ?$$

Un balon de cauciuc conține aer la temperatura $t_1 = 27^\circ\text{C}$ și presiunea atmosferică normală $p_1 = p_0 = 10^5 \text{ Pa}$. De câte ori se va micșora volumul aerului, dacă balonul se scufundă în apă la adîncimea $h = 10 \text{ m}$, unde temperatura este $t_2 = 4^\circ\text{C}$? Se va considera accelerația gravitațională $g \approx 10 \text{ m/s}^2$ și densitatea apei $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Rezolvare

La scufundarea balonului are loc o transformare, în urma căreia variază toți parametrii de stare conform ecuației (1.28):

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}. \quad (1.33)$$

p_2 , presiunea aerului din balon la adâncimea h , se determină din condiția de echilibru, fiind egală cu suma dintre presiunea atmosferică p_0 și presiunea hidrostatică ρgh . Avem: $p_2 = (p_0 + \rho gh)$. Din (1.33) obținem:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{(p_1 + \rho gh) T_1}{p_0 T_2} = \left(1 + \frac{\rho gh}{p_0}\right) \frac{T_1}{T_2}; \quad \frac{V_1}{V_2} \approx 2,2.$$

Problemă rezolvată 5

Se dă:

$V_1 = 50 \text{ cm}^3$,
 $V_2 = 150 \text{ cm}^3$,
 $p_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$,
 $p_2 = 10^5 \text{ Pa}$,
 $T_1 = 330 \text{ K}$,
 $T_2 = 273 \text{ K}$,
 $T = 300 \text{ K}$

SI:

$5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$,
 $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$

$p - ?$

Pa

Un recipient este împărțit de un perete în două compartimente cu volumele $V_1 = 50 \text{ cm}^3$ și $V_2 = 150 \text{ cm}^3$. În primul compartiment se află un gaz ideal cu masa m_1 la presiunea $p_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ și temperatura $T_1 = 330 \text{ K}$, iar în al doilea – același gaz cu masa m_2 la presiunea $p_2 = 10^5 \text{ Pa}$ și temperatura $T_2 = 273 \text{ K}$. Care va fi presiunea gazului după înlăturarea peretelui despărțitor, dacă temperatura lui devine $T = 300 \text{ K}$?

Rezolvare

După înlăturarea peretelui, gazul ocupă întregul recipient cu volumul $V_1 + V_2$, iar masa lui este $m_1 + m_2$. Gazul este descris de ecuația Clapeyron–Mendeleev: $p(V_1 + V_2) = \frac{m_1 + m_2}{M} RT$, de unde presiunea $p = \frac{(m_1 + m_2) RT}{M(V_1 + V_2)}$, M fiind masa molară a gazului. Aplicând ecuația Clapeyron–Mendeleev la gazul din fiecare compartiment, avem: $m_1 = \frac{p_1 V_1 M}{RT_1}$; $m_2 = \frac{p_2 V_2 M}{RT_2}$. Însumând aceste două expresii în formula pentru p , obținem:

$$p = \left(\frac{p_1 V_1}{T_1} + \frac{p_2 V_2}{T_2} \right) \frac{T}{V_1 + V_2}; \quad p \approx 1,3 \cdot 10^5 \text{ Pa}.$$

Problemă rezolvată 6

Se dă:

$T_1 = 300 \text{ K}$,
 $T_3 = 600 \text{ K}$

$T_2 - ?$

O masă dată de gaz ideal efectuează o transformare ciclică reprezentată în figura 1.18. Determinați temperatura în starea 2, dacă în stările 1 și 3 ea este de 300 K și, respectiv, 600 K.

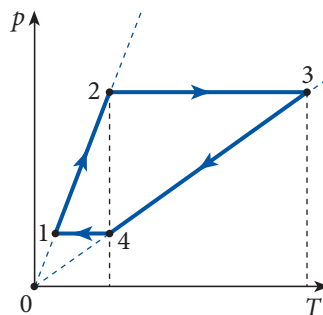


Fig. 1.18

Rezolvare

Din figura 1.18 se observă că stările 2 și 4 se află pe una și aceeași izotermă, adică $T_2 = T_4$. Totodată, se mai observă că

transformarea constă din izobarele $2 \rightarrow 3$ și $4 \rightarrow 1$, de asemenea din izocorele $1 \rightarrow 2$ și $3 \rightarrow 4$. Folosind legea transformării izocore (1.26), putem scrie:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}, \quad \frac{p_3}{T_3} = \frac{p_4}{T_4}.$$

Întrucît $p_2 = p_3$, $p_4 = p_1$ și $T_2 = T_4$, egalitățile capătă forma:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_3}{T_2}, \quad \frac{p_3}{T_3} = \frac{p_1}{T_2}.$$

Înmulțim aceste egalități parte cu parte și obținem:

$$\frac{p_1 p_3}{T_1 T_3} = \frac{p_1 p_3}{T_2^2},$$

de unde

$$T_2 = \sqrt{T_1 T_3} \approx 424,3 \text{ K}.$$

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Cum se explică legea Boyle–Mariotte din punct de vedere cinetico-molecular?
2. Construiți graficul unei transformări izoterme a gazului ideal în coordonatele: p și V ; V și t ; p și t . Cum sînt amplasate izotermele aceleiași mase de gaz pentru temperaturi diferite?
3. Enunțați legea lui Gay-Lussac. Ce reprezintă coeficientul de dilatare izobară?
4. Enunțați legea lui Charles. Ce reprezintă coeficientul termic al presiunii?
5. Cum se explică legile lui Gay-Lussac și Charles din punct de vedere cinetico-molecular?
6. Construiți graficul transformării izobare a unei mase de gaz ideal în coordonatele: p și V ; V și T ; p și T . Cum sînt amplasate izobarele aceleiași mase de gaz pentru diferite presiuni?
7. Construiți graficul transformării izocore a unei mase de gaz ideal în coordonatele: p și V ; V și T ; p și T . Cum sînt amplasate izocorele aceleiași mase de gaz pentru diferite valori ale volumului?
8. Descrieți ecuațiile lui Clapeyron și Clapeyron–Mendeleev. Prin ce se deosebesc ele?
9. Construiți graficul dependenței densității unui gaz ideal de temperatura absolută într-o transformare izobară și graficul dependenței densității gazului ideal de presiune într-o transformare izotermă.
10. Un gaz ideal este supus unei transformări ilustrate în figura 1.19. Care este reprezentarea grafică a acestei transformări în coordonatele p , V și V , T ?
11. O bulă de aer se ridică de pe fundul unui rezervor cu apă la suprafață. Care este adîncimea rezervorului, dacă volumul bulei de aer s-a mărit de două ori cînd a ajuns la suprafața apei? Temperatura apei nu variază cu înălțimea. Presiunea atmosferică se consideră normală.
12. Într-un tub cilindric sudat la un capăt și așezat orizontal se află o coloană de mercur cu lungimea de 10 cm, care închide o cantitate de aer cu volumul de 453 mm^3 . Determinați presiunea atmosferică, știind că volumul aerului se micșorează pînă la 400 mm^3 cînd tubul este așezat în poziție verticală cu deschizătura în sus. Densitatea mercurului este $\rho = 13,6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.

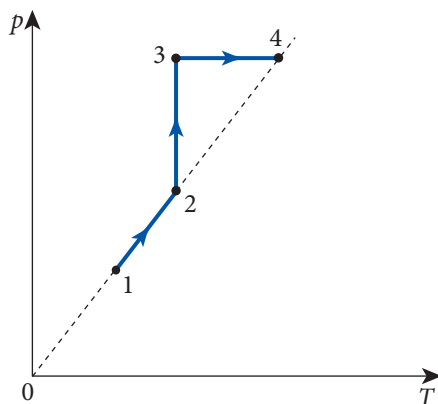


Fig. 1.19

13. Într-o transformare izotermă a unui gaz ideal presiunea lui a crescut cu 20 kPa. Care este presiunea finală a gazului, dacă în timpul transformării volumul lui s-a micșorat de $n = 3$ ori?
14. Un gaz ocupă volumul egal cu 5 m^3 la o temperatură de 273 K. Care va fi volumul acestui gaz la aceeași presiune, dar cu temperatura 273°C ?
15. Temperatura unui gaz închis într-un cilindru orizontal cu un piston mobil s-a mărit de $n = 2,5$ ori. Cu cât se va deplasa pistonul după încălzire, dacă inițial el se afla la distanța $L = 20 \text{ cm}$ de la capătul închis al cilindrului? Presiunea gazului se consideră constantă.
16. Un gaz ideal a fost încălzit izobar cu 150°C . Care a fost temperatura inițială a gazului, dacă densitatea lui s-a micșorat de 1,5 ori?
17. Gazul dintr-un balon închis a fost încălzit de la 0 pînă la 100°C . În decursul încălzirii presiunea lui a crescut cu $0,37 \text{ MPa}$. Care a fost presiunea inițială a gazului?
18. Într-un tub cilindric orizontal cu aria secțiunii $S = 3 \text{ cm}^2$ se află în echilibru două pistoane ușoare, care delimitează de mediul exterior un anumit volum de gaz la temperatura de 300 K . Pistoanele sînt legate între ele cu un fir, care rezistă la întindere pînă la o tensiune maximă egală cu 20 N . Pînă la ce temperatură poate fi încălzit gazul dintre pistoane, pentru ca firul de legătură să nu se rupă? Presiunea atmosferică $p_0 = 10^5 \text{ Pa}$. Pistoanele se mișcă fără frecări.
19. Un cilindru vertical, închis cu un piston de masă neglijabilă și aria secțiunii $S = 20 \text{ cm}^2$, conține un gaz ideal la presiunea $p_0 = 10^5 \text{ Pa}$ și temperatura $T_1 = 290 \text{ K}$. Gazul este încălzit pînă la temperatura $t_2 = 162^\circ\text{C}$. Care este masa corpului ce trebuie așezat pe piston pentru ca volumul să ia valoarea inițială?
20. Cum se modifică volumul unui gaz ideal în decursul unei transformări ciclice pe care acesta o realizează după cum este arătat în *figura 1.20*? Indicați pe grafic punctele care corespund volumelor minim și maxim din această transformare.
21. Un gaz ideal ce ocupă volumul $V_1 = 20 \text{ L}$ se află sub presiunea $p_1 = 10^5 \text{ Pa}$ la temperatura $t_1 = 17^\circ\text{C}$. Care va fi presiunea gazului, dacă aceeași masă de gaz la temperatura $t_2 = 100^\circ\text{C}$ va ocupa volumul $V_2 = 10 \text{ L}$?
22. În cilindrul unui motor cu ardere internă, presiunea și temperatura combustibilului gazos la începutul cursei de comprimare erau egale cu $p_1 = 10^5 \text{ Pa}$ și $T_1 = 330 \text{ K}$. Determinați temperatura lui la sfîrșitul cursei de comprimare, dacă volumul s-a micșorat de $n = 4$ ori, iar presiunea s-a mărit pînă la $8 \cdot 10^5 \text{ Pa}$.
23. Un gaz ideal se dilată conform legii: a) $p = \text{const.}$; b) $pV^2 = \text{const.}$; c) $p/V = \text{const.}$ Determinați ce se întîmplă cu gazul în aceste transformări: se încălzește sau se răcește?
24. Într-un balon cu volumul de 25 L se află 1 kg de oxigen sub presiunea de 3 MPa . Calculați temperatura oxigenului.
25. Determinați densitatea azotului la temperatura $t = 7^\circ\text{C}$ și presiunea $p = 83 \text{ kPa}$.
26. În condiții normale un gaz cu masa egală cu $1,77 \text{ g}$ ocupă un volum de 10 L . Determinați masa molară a gazului și precizați natura lui.
27. Un vas cu volumul $V = 300 \text{ cm}^3$ este împărțit în două părți egale cu un perete poros. În prima jumătate se află 28 mg de azot, iar în a doua – 32 mg de oxigen. Determinați ce presiuni se vor stabili în cele două compartimente, dacă prin peretele poros pot trece numai moleculele de azot. Temperatura se menține constantă și egală cu 300 K .
28. Determinați densitatea unui amestec de 4 g de heliu și 28 g de azot la temperatura de 300 K și presiunea de 100 kPa .

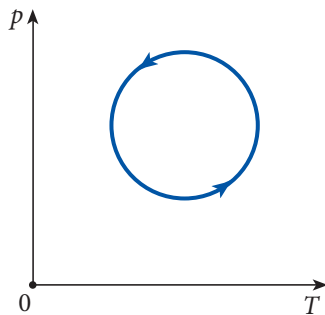


Fig. 1.20

TEST DE EVALUARE SUMATIVĂ

PROFIL REAL

1	Completați spațiile punctate astfel încât următoarele afirmații să fie adevărate:	
	a) Într-o transformare izotermă a unei mase ... de gaz ...	1 p.
	b) Variația relativă a volumului unei mase date de gaz ... este ... cu temperatura.	1 p.
	c) Pentru un mol de gaz ideal produsul dintre presiunea și volumul lui este ...	1 p.
2	Determinați valoarea de adevăr a următoarelor afirmații, marcînd „A” dacă afirmația este adevărată și „F” dacă afirmația este falsă.	
	a) Numărul de molecule dintr-un mol depinde de cantitatea de substanță. <input type="checkbox"/>	1 p.
	b) Între moleculele unei substanțe acționează simultan atît forțe de atracție, cît și forțe de respingere. <input type="checkbox"/>	1 p.
	c) În cazul unui gaz ideal care participă la o transformare izobară, creșterea volumului este însoțită de micșorarea temperaturii. <input type="checkbox"/>	1 p.
	Itemii 3 și 4 sînt alcătuiți din cîte două afirmații legate între ele prin conjuncția deoarece . Stabiliți dacă afirmațiile sînt adevărate (scriind A) sau false (scriind F) și dacă între ele există relația cauză–efect (scriind da sau nu).	
3	Presiunea, volumul și temperatura sînt într-o dependență funcțională care descrie o stare de echilibru al unei cantități de gaz ideal date, deoarece parametrii termodinamicii p , V și T reprezintă mărimi fizice independente.	
	Răspuns:	3 p.
	afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .	
4	La mărirea temperaturii unui gaz ideal de patru ori, vitezele moleculelor gazului cresc de două ori, deoarece temperatura este măsura mișcării termice a moleculelor.	
	Răspuns:	3 p.
	afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .	

5	Un gaz ideal se află la presiunea atmosferică normală. Care este densitatea gazului dacă viteza termică a moleculelor lui este de 600 m/s?	2 p.
6	La comprimarea izotermă a unui gaz ideal de la volumul $V_1 = 30$ L pînă la volumul $V_2 = 10$ L, presiunea lui s-a mărit cu 50 Pa. Care a fost presiunea inițială a gazului?	2 p.
7	Într-un recipient cu volumul de 1 L se află $6 \cdot 10^{22}$ molecule de azot și 6,4 g de oxigen la temperatura de 27°C. Să se calculeze:	
	a) presiunea amestecului de gaze;	3 p.
	b) volumul ocupat de amestec în urma unei transformări izobare, dacă temperatura gazului s-a mărit cu 100°C.	3 p.
8	Într-un vas cu volumul $V_1 = 10$ L se află oxigen la temperatura $T_1 = 27^\circ\text{C}$ și presiunea $p_1 = 3$ MPa. Determinați:	
	a) masa oxigenului din vas;	2 p.
	b) numărul de moli de oxigen care trebuie evacuați din vas pentru ca la $T_1 = \text{const.}$ presiunea să se micșoreze pînă la $p_2 = 300$ kPa;	3 p.
	c) masa de oxigen care mai trebuie evacuată pentru ca la creșterea temperaturii pînă la $T_3 = 127^\circ\text{C}$ presiunea p_2 să rămînă constantă;	3 p.
	d) valoarea vitezei termice a moleculelor în starea inițială și cea a raportului energiilor cinetice medii ale moleculelor ce corespund stărilor cu temperaturile T_3 și T_1 .	3 p.

PROFIL UMANIST

1	Completați spațiile punctate astfel încât următoarele afirmații să fie adevărate:	
	a) Unitatea de cantitate de substanță este ... și reprezintă una dintre ... ale SI.	1 p.
	b) Presiunea unui gaz este ... cu energia cinetică medie a mișcării de translație a tuturor moleculelor din unitatea de volum.	1 p.
	c) Într-o transformare izobară a unei mase date de gaz ideal raportul dintre ... și ... rămîne constant.	1 p.
2	Determinați valoarea de adevăr a următoarelor afirmații, marcînd „A” dacă afirmația este adevărată și „F” dacă afirmația este falsă.	
	a) Variația temperaturii exprimată în grade Celsius este numeric egală cu variația temperaturii exprimată în Kelvini. <input type="checkbox"/>	1 p.
	b) Ecuația de stare a gazului ideal exprimă legătura dintre parametrii macroscopici ai unei cantități de gaz date. <input type="checkbox"/>	1 p.
	c) La încălzirea izocoră a unei mase de gaz date presiunea lui se micșorează. <input type="checkbox"/>	1 p.
	Itemii 3 și 4 sînt alcătuiți din cîte două afirmații legate între ele prin conjuncția deoarece . Stabiliți dacă afirmațiile sînt adevărate (scriind A) sau false (scriind F) și dacă între ele există relația cauză–efect (scriind da sau nu).	
3	Cazul ideal poate fi considerat un sistem de puncte materiale ce se mișcă liber, deoarece moleculele gazului ideal se află într-o permanentă mișcare haotică.	
	Răspuns:	3 p.
	afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .	
4	La mărirea temperaturii unei mase date de gaz ideal într-o transformare izocoră, presiunea lui crește, deoarece la temperaturi mai mari numărul de ciocniri al moleculelor pe unitatea de suprafață a incintei cu gaz în unitatea de timp este mai mare.	
	Răspuns:	3 p.
	afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .	
5	La presiunea de 200 kPa, concentrația moleculelor unui gaz ideal dintr-un recipient este de $3 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$. Determinați energia cinetică medie a mișcării de translație a unei molecule a acestui gaz.	2 p.

6	Un gaz aflat în condiții normale de presiune și temperatură are masa de 42 g și ocupă volumul $V = 30$ L. Care este masa molară a acestui gaz?	2 p.
7	Într-un recipient se află oxigen la presiunea de 200 kPa și temperatura de 300 K. Energia cinetică medie a mișcării de translație a tuturor moleculelor de oxigen este egală cu 12,42 kJ. Determinați:	
	a) masa oxigenului din recipient;	3 p.
	b) volumul recipientului.	3 p.
8	Două recipiente sînt legate printr-un tub prevăzut cu robinet. În unul din ele se află 1 kmol de hidrogen la presiunea de 4 MPa și temperatura de 300 K, iar celălalt este vidat. După deschiderea robinetului, presiunea și temperatura hidrogenului au devenit egale cu 2 MPa și, respectiv, 270 K. Determinați:	
	a) masa hidrogenului și volumul primului recipient;	3 p.
	b) densitatea hidrogenului pînă la deschiderea robinetului;	2 p.
	c) volumul celui de-al doilea recipient;	3 p.
	d) raportul vitezelor termice ale moleculelor de hidrogen pînă și după deschiderea robinetului.	3 p.

BAZELE TERMODINAMICII

2.1

ENERGIA INTERNĂ A GAZULUI IDEAL

a. Energia internă – mărime de stare

Sistemele macroscopice studiate în fizica moleculară și în termodinamică se află, de regulă, în repaus. Deci energia mecanică a acestora nu se modifică. Transformările energetice care au loc în fenomenele termice sînt însoțite de variația energiei determinată de structura internă a sistemului, numită **energie internă**.

Conform definiției,

energia internă U a unui sistem termodinamic este egală cu suma energiilor cinetice ale mișcării moleculelor lui și ale energiilor potențiale de interacțiune dintre ele.

Notăm cu E_c suma energiilor cinetice și cu E_p suma energiilor potențiale ale moleculelor. Atunci energia internă:

$$U = E_c + E_p. \quad (2.1)$$

Există și alte forme de energie legate de structura internă a sistemului termodinamic, de exemplu, energia cinetică a mișcării electronilor din atom în jurul nucleului acestuia, energia potențială de interacțiune a electronilor cu nucleul și între ei etc. În fenomenele termice, moleculele nu-și modifică structura. Astfel, la încălzirea și topirea gheții, la încălzirea apei moleculele de apă sînt aceleași, se schimbă doar caracterul mișcării și al interacțiunii lor. Prin urmare, energiile corespunzătoare mișcării și interacțiunilor din interiorul moleculelor sînt constante și nu influențează decurgerea fenomenelor termice. Aceasta justifică faptul că la definirea energiei interne (2.1) ne-am limitat numai la energiile legate de mișcarea și interacțiunea moleculelor.

Din teoria cinetico-moleculară cunoaștem că energiile cinetice ale moleculelor sînt determinate de temperatura T . Prin urmare, suma energiilor cinetice ale moleculelor sistemului termodinamic este în funcție de temperatura acestuia: $E_c = E_c(T)$.

Din mecanică știm că energia potențială de interacțiune a corpurilor depinde de pozițiile lor reciproce, de distanța dintre ele. Pe de altă parte, distanțele dintre molecule depind de volumul V al sistemului: la un volum mai mare distanțele dintre moleculele gazului sînt mai mari. Deci suma energiilor potențiale de interacțiune dintre molecule este în funcție de volumul sistemului $E_p = E_p(V)$.

Relația (2.1) capătă forma:

$$U = E_c(T) + E_p(V), \quad (2.2)$$

adică energia internă este în funcție de volumul sistemului și de temperatura acestuia:

$$U = U(V, T). \quad (2.3)$$

Ecuția (2.3) se numește **ecuație calorică de stare**.

Energia cinetică și cea potențială, după cum cunoaștem din mecanică, sînt mărimi de stare. Rezultă că și **energia internă este mărime de stare**, adică valoarea ei este determinată de starea sistemului, de volumul și temperatura acestuia la momentul dat și nu depinde de stările în care s-a aflat sistemul în momentele precedente. Prin urmare, **variația energiei interne a sistemului la trecerea din starea inițială 1**, caracterizată de parametrii V_1 și T_1 , **în starea finală 2**, caracterizată de parametrii V_2 și T_2 , **nu depinde de calea (procesul) de trecere între aceste stări** și este egală cu:

$$\Delta U_{12} = U(V_2, T_2) - U(V_1, T_1).$$

Notînd $U(V_1, T_1) = U_1$ și $U(V_2, T_2) = U_2$, avem:

$$\Delta U_{12} = U_2 - U_1. \quad (2.4)$$

Procesul în care starea finală coincide cu cea inițială se numește proces ciclic (transformare ciclică).

Cu alte cuvinte, în urma unui proces ciclic sistemul revine la starea sa inițială. Din (2.4) rezultă că variația energiei interne într-un proces ciclic este nulă:

$$\Delta U_{\text{cicl.}} = 0. \quad (2.5)$$

b. Energia internă a gazului ideal monoatomic

Cunoașterea ecuației calorice de stare (2.3) este necesară la descrierea proprietăților termice ale sistemelor termodinamice și a fenomenelor ce au loc în acestea. Deducerea expresiei pentru energia internă însă este foarte dificilă, îndeosebi din cauza caracterului complex al interacțiunii dintre molecule. De aceea ne vom limita la cazul gazului ideal, ale cărui molecule nu interacționează la distanță.

Astfel, energia potențială de interacțiune dintre moleculele gazului ideal este nulă: $E_p(V) = 0$. Din (2.3) rezultă:

$$U^{id} = U_c(T) = E_c(T), \quad (2.6)$$

adică **energia internă a gazului ideal este în funcție doar de temperatura lui**. Această legitate a fost stabilită pentru prima dată experimental de fizicianul englez James Joule (1818–1889) și enunțată sub forma:

Energia internă a gazului ideal la temperatură constantă nu depinde de volum.

Aceasta reprezintă **legea lui Joule**, echivalentă cu relația (2.6).

În cadrul teoriei cinetico-moleculare a gazului ideal a fost obținută expresia energiei cinetice medii a mișcării de translație a moleculei (1.12):

$$\bar{\epsilon}_{tr.} = \frac{3}{2} kT. \quad (2.7)$$

Molecula constituită din doi sau din mai mulți atomi efectuează nu numai mișcare de translație, ci și mișcări de rotație în jurul axelor ce trec prin centrul ei, deci posedă și energie cinetică de rotație.

Ne vom limita la cazul moleculelor monoatomice, cum sînt moleculele gazelor inerte, ca heliul, argonul, neonul ș.a. Acestea nu posedă energie cinetică de rotație (la rotația în jurul unei axe punctele de pe ea rămîn în repaus). Prin urmare, formula (2.7) exprimă energia cinetică totală medie a moleculei de gaz ideal monoatomic. Pe de altă parte, conform definiției, energia cinetică medie a unei molecule este egală cu suma energiilor cinetice ale tuturor moleculelor, împărțită la numărul acestora:

$$\bar{\epsilon}_{tr} = \frac{E_c(T)}{N}. \quad (2.8)$$

Din relațiile (2.6), (2.7) și (2.8) obținem:

$$U^{id} = E_c(T) = N\bar{\epsilon}_{tr} = \frac{3}{2}NkT$$

sau

$$U^{id} = \frac{3}{2}NkT. \quad (2.9)$$

Aceasta este expresia pentru energia internă a gazului ideal monoatomic.

Numărul de molecule $N = \nu N_A$, unde ν este cantitatea de substanță ($\nu = m/M$) și N_A – constanta (numărul) lui Avogadro. Formula (2.9) se scrie sub forma $U^{id} = \frac{3}{2}\nu N_A kT$. Dar $N_A k = R$ este constanta universală a gazelor. Obținem:

$$U^{id} = \frac{3}{2}\nu RT = \frac{3}{2}\frac{m}{M}RT. \quad (2.10)$$

Ecuția (2.10) este numită **ecuația calorică de stare a gazului ideal monoatomic**. Variația energiei interne în conformitate cu (2.10) este

$$\Delta U^{id} = \frac{3}{2}\nu R \Delta T. \quad (2.11)$$

Folosind ecuația termică de stare a gazului ideal (1.30), putem scrie ecuația calorică și sub forma:

$$U^{id} = \frac{3}{2}pV. \quad (2.10, a)$$

Ulterior va fi folosită o expresie sau alta, în funcție de mărimile care sînt cunoscute.

Problemă rezolvată

Se dă:

$$n = 5 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3},$$

$$V = 2 \text{ L},$$

$$T = 300 \text{ K}$$

$$U - ?$$

SI:

$$2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$J - ?$$

Un gaz ideal monoatomic cu concentrația $n = 5 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ocupă un volum de 2 L la temperatura de 300 K. Care este energia internă a acestui gaz?

În conformitate cu relația (2.10, a), pentru energia internă a gazului avem:

$$U = \frac{3}{2}pV.$$

Presiunea gazului se determină cu ajutorul ecuației fundamentale a teoriei cinetico-moleculare:

$$p = nkT,$$

unde $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K este constanta lui Boltzman.

Astfel, pentru energia internă obținem:

$$U = \frac{3}{2}nkTV = \frac{3}{2} \cdot 5 \cdot 10^{24} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 3 \cdot 10^2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 62,1 \text{ J}.$$

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Cum se definește energia internă a unui sistem termodinamic?
2. Care parametri (mărimi) ce caracterizează sistemul termodinamic determină energia internă a acestuia?
3. Cum înțelegeți afirmația că energia internă este mărime de stare?
4. Care proces termodinamic se numește ciclic?
5. Cu ce este egală variația energiei interne a sistemului într-un proces ciclic?
6. Variația energiei interne a unui sistem la trecerea acestuia din starea 1 în starea 2 este $\Delta U_{12} = 150$ J, iar la trecerea din starea 1 în starea 3 este $\Delta U_{13} = -60$ J. Cu ce este egală variația energiei interne a acestui sistem la trecerea din starea 2 în starea 3?
7. La trecerea unui sistem termodinamic din starea 1 în starea 2, energia sa internă variază cu $\Delta U_{12} = 700$ J, iar la trecerea din starea 2 în starea 3 – cu $\Delta U_{23} = -180$ J. Care este variația energiei interne a sistemului la trecerea din starea 3 în starea 1?
8. Temperatura unei cantități $\nu = 0,2$ moli de heliu crește de la $T_1 = 240$ K pînă la $T_2 = 320$ K. Determinați variația energiei interne a heliului.
9. O masă de neon ocupă volumul $V_1 = 3$ L la presiunea $p = 2 \cdot 10^5$ Pa. În urma dilatării izobare, energia internă a acestei mase a variat cu $\Delta U = 1,2$ kJ. Care este volumul final ocupat de neon?

2.2

LUCRUL GAZULUI ÎN PROCESELE TERMODINAMICE

Să analizăm experimentul următor. Sub pistonul blocat al unui cilindru se află aer la presiune ridicată, pe piston – câteva corpuri (fig. 2.1, a). După deblocarea pistonului, aerul din cilindru se dilată și pistonul se ridică în sus împreună cu corpurile de pe el (fig. 2.1, b). Acest experiment arată că gazul, dilatăndu-se, efectuează lucru mecanic pe seama energiei sale interne. În consecință, energia potențială a pistonului se mărește.

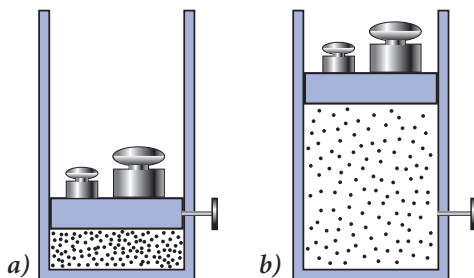


Fig. 2.1

Să deducem expresia pentru lucrul efectuat de gaz la dilatare, care se va considera foarte lentă, astfel încât procesul de dilatare să poată fi un proces de echilibru. Forța ce acționează asupra pistonului este forța de presiune F_p egală cu produsul dintre presiunea gazului p și aria pistonului S , adică $F_p = pS$. La dilatare presiunea variază, deci variază și forța de presiune.

Admitem că deplasarea pistonului Δh este foarte mică, astfel încât variația forței de presiune să poată fi neglijată. În acest caz este vorba de ceea ce se numește

lucru elementar și se calculează ca lucrul unei forțe constante de aceeași direcție și sens cu deplasarea (fig. 2.2). Avem $\Delta L = F_p \cdot \Delta h = pS\Delta h$. După cum se vede din figură, produsul $S\Delta h = \Delta V$ este variația volumului gazului. Expresia lucrului elementar al forței de presiune a gazului are forma:

$$\Delta L = p \cdot \Delta V. \quad (2.12)$$

Această relație arată că la dilatare ($\Delta V > 0$) gazul efectuează un lucru pozitiv, denumit și lucru cedat în exterior, iar atunci când este comprimat ($\Delta V < 0$), efectuează un lucru negativ, adică primit din exterior.

Între lucrul efectuat de gaz asupra corpurilor din exterior și lucrul $\Delta L'$ efectuat de acestea asupra gazului există o relație simplă. Ea este o consecință a principiului acțiunii și reacțiunii. Conform acestui principiu, forța de presiune \vec{F}_p a gazului asupra pistonului și forța \vec{F}' cu care pistonul apasă asupra gazului satisfac condiția $\vec{F}' = -\vec{F}_p$. Deplasarea punctelor de aplicare ale acestor forțe este aceeași Δh . Prin urmare, lucrurile efectuate de ele sînt egale în valoare și de semne opuse:

$$\Delta L' = -\Delta L = -p\Delta V. \quad (2.13)$$

Deci la comprimare, când lucrul gazului este negativ, forțele externe efectuează un lucru pozitiv ($\Delta L' > 0$).

Din formula (2.12) observăm că gazul efectuează lucrul numai în cazul în care volumul său variază ($\Delta L \neq 0$ numai dacă $\Delta V \neq 0$). În transformarea izocoră ($V = \text{const.}, \Delta V = 0$), lucrul gazului este nul.

Lucrul gazului se calculează relativ simplu în procesul izobar, când presiunea p , deci și forța de presiune F_p rămîn constante. La dilatarea izobară a gazului la presiunea p de la volumul inițial V_1 pînă la volumul final V_2 , lucrul gazului, în acord cu (2.12), este:

$$L_p = p(V_2 - V_1). \quad (2.14)$$

Comparăm formula (2.14) cu expresia $L = F_s \cdot s$ pentru lucrul forței constante. Observăm o anumită analogie. Formula din mecanică conține produsul dintre proiecția forței și deplasarea egală cu variația coordonatei, iar formula (2.14) conține produsul dintre presiune și variația volumului. Această analogie sugerează ideea folosirii graficelor la calcularea lucrului gazului. Pe axele acestora în locul coordonatei și al proiecției forței trebuie să fie depuse volumul și presiunea.

Să analizăm mai întîi cazul în care presiunea rămîne constantă, adică dilatarea izobară a gazului, construind graficul respectiv pe diagramă (fig. 2.3, a).

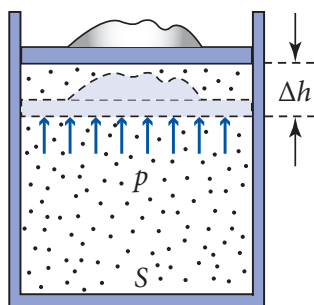


Fig. 2.2

Observăm că lucrul gazului (2.14) este numeric egal cu aria dreptunghiului ale cărui laturi sînt: graficul izobarei, porțiunea de abscisă corespunzătoare volumelor V_1 și V_2 și segmentele de dreaptă ce unesc capetele izobarei cu punctele respective de pe axa volumelor.

La calcularea lucrului gazului cînd presiunea variază se aplică metoda deja cunoscută. Variația totală a volumului ($V_2 - V_1$) se împarte într-un număr mare de porțiuni mici ΔV_i , astfel încît la variația ΔV_i presiunea p_i să rămînă, efectiv, constantă. Lucrul efectuat de gaz la această variație a volumului, după cum se vede din figura 2.3, b, este numeric egal cu aria fișiei înguste cu lățimea ΔV_i și înălțimea p_i (în figură are culoare închisă). Lucrul total se obține prin însumarea lucrurilor elementare. Adunînd ariile tuturor fișiiilor înguste, obținem aria de sub grafic. Prin urmare, în cazul presiunii variabile, lucrul gazului se determină în mod grafic, ca și în cazul presiunii constante, fiind numeric egal cu aria figurii de sub grafic.

Interpretarea grafică a lucrului gazului permite să stabilim o proprietate importantă a acestuia. Admitem că gazul trece din starea inițială 1 în starea finală 2 pe două căi diferite – o dată pe calea 1a2 și a doua oară pe calea 1b2 (fig. 2.4). După cum se vede din figură, ariile de sub grafice ($1a2V_2V_11$ și $1b2V_2V_11$) sînt diferite. Deci lucrul efectuat de gaz în aceste două procese, de asemenea, diferă, anume $L_{1a2} > L_{1b2}$.

Prin urmare, lucrul efectuat de gaz la trecerea dintr-o stare în alta depinde nu numai de aceste stări, ci și de procesul (calea) prin care gazul a ajuns din starea inițială în cea finală. Mărimile care posedă această proprietate se numesc *mărimi de proces*. Astfel, **lucrul gazului la variația volumului său este o mărime de proces**.

Să calculăm lucrul gazului într-un proces ciclic (fig. 2.5). Admitem că punctul ce reprezintă starea gazului parcurge graficul ciclului în sensul orar (fig. 2.5, a). Fie starea a corespunde volumului minim, iar starea c – volumului maxim ocupat de gaz în acest ciclu.

Lucrul gazului în procesul ciclic este egal cu suma lucrurilor pe porțiunile lui: $L_{\text{cicl.}} = L_{abc} + L_{cda}$. În acord cu interpretarea grafică, lucrul L_{abc} este numeric egal cu aria figurii $abcV_{\text{max.}}V_{\text{min.}}$, a, luată cu semnul plus, iar lucrul L_{cda} este numeric egal cu aria figurii $cdaV_{\text{min.}}V_{\text{max.}}$, c luată cu semnul minus (în procesul abc gazul se dilată, lucrul lui fiind pozitiv, iar în procesul cda gazul este comprimat, lucrul fiind negativ). Adunînd algebric aceste două arii, obținem aria figurii limitate de graficul ciclului, luată cu semnul plus. Astfel, **lucrul gazului într-un proces ciclic este diferit de zero**.

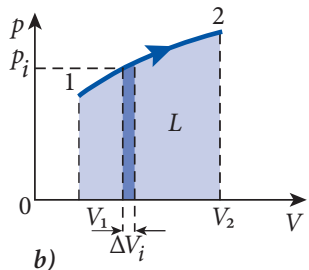
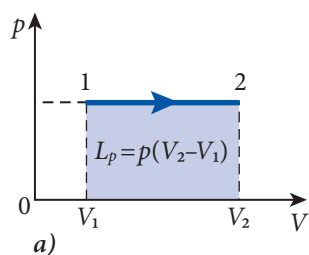


Fig. 2.3

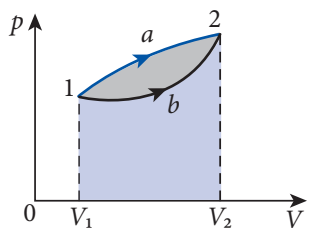


Fig. 2.4

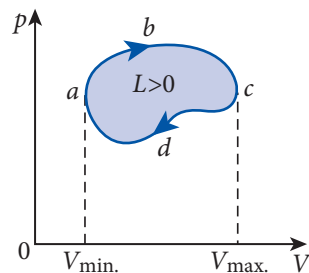


Fig. 2.5, a

Acest rezultat constituie o consecință a faptului că lucrul gazului este o mărime de proces.

Dacă ciclul este parcurs în sens antiorar (în sens trigonometric), atunci curba efg ce corespunde dilatării (fig. 2.5, b) se află sub curba ghe ce corespunde comprimării. Adunând algebric ariile de sub aceste curbe cu semnele corespunzătoare, obținem aria figurii limitate de grafic, luată cu semnul minus. Lucrul gazului în acest proces ciclic este negativ.

Faptul că lucrul gazului în procesul ciclic este diferit de zero constituie un rezultat foarte important, asigură posibilitatea funcționării motoarelor termice care efectuează lucrul mecanic pe seama energiei interne a corpurilor.

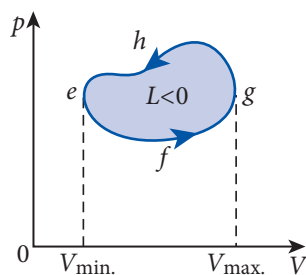


Fig. 2.5, b

Problemă rezolvată

Se dă:

$\nu = 5$ moli,
 $T_1 = 320$ K,
 $T_3 = 500$ K

$L = ?$

O cantitate $\nu = 5$ moli de gaz ideal efectuează o transformare ciclică care constă din două izobare și două izocore (fig. 2.6). Calculați lucrul efectuat de acest gaz, dacă se cunoaște că stările 2 și 4 se află pe aceeași izotermă, iar temperatura în stările 1 și 3 este de 320 K și, respectiv, 500 K.

Rezolvare

Lucrul efectuat de gaz în transformarea ciclică menționată se determină cu aria dreptunghiului 1 2 3 4 din figura 2.6:

$$L = (p_2 - p_1) (V_4 - V_1).$$

Pentru determinarea variațiilor presiunii $p_2 - p_1$ și a volumului $V_4 - V_1$, vom utiliza legile transformării izocore $1 \rightarrow 2$ și, respectiv, a celei izobare $4 \rightarrow 1$. Avem:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \text{ sau } p_2 = \frac{T_2}{T_1} p_1, \text{ de unde } p_2 - p_1 = \frac{T_2 - T_1}{T_1} p_1;$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_4}{T_4} \text{ sau } V_4 = \frac{T_4}{T_1} V_1 = \frac{T_2}{T_1} V_1, \text{ de unde } V_4 - V_1 = \frac{T_2 - T_1}{T_1} V_1.$$

S-a luat în considerare că stările 2 și 4 se află pe aceeași izotermă, adică $T_4 = T_2$. Introducând relațiile pentru $p_2 - p_1$ și $V_4 - V_1$ în expresia pentru lucrul efectuat de gaz, obținem:

$$L = \frac{(T_2 - T_1)^2}{T_1^2} p_1 V_1.$$

Folosind ecuația de stare $p_1 V_1 = \nu R T_1$, lucrul devine

$$L = \frac{\nu R}{T_1} (T_2 - T_1)^2.$$

Pentru determinarea temperaturii T_2 , vom scrie ecuațiile izocorelor $1 \rightarrow 2$ și $3 \rightarrow 4$, luând în considerare de asemenea faptul că $p_3 = p_2$, $p_4 = p_1$ și $T_4 = T_2$. Avem:

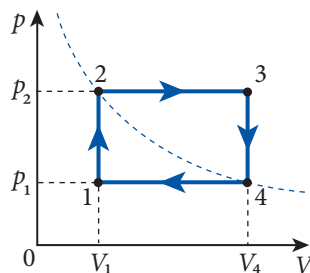


Fig. 2.6

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \text{ și } \frac{p_3}{T_3} = \frac{p_4}{T_4} \text{ sau } \frac{p_2}{T_3} = \frac{p_1}{T_2}.$$

Înmulțind ecuațiile acestor izocore parte cu parte, obținem:

$$\frac{p_1 p_2}{T_1 T_3} = \frac{p_1 p_2}{T_2^2},$$

de unde

$$T_2 = \sqrt{T_1 T_3}.$$

Astfel, pentru lucrul efectuat de gaz în transformarea ciclică, avem:

$$L = \frac{\nu R}{T_1} (\sqrt{T_1 T_3} - T_1)^2 = \nu R (T_3 - 2\sqrt{T_1 T_3} + T_1); L = 831 \text{ J}.$$

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Cum poate fi determinat lucrul gazului, dacă este cunoscut graficul presiunii în funcție de volum?
2. În ce caz lucrul gazului este negativ?
3. Ce înseamnă că lucrul gazului este mărime de proces?
4. Ce puteți spune despre lucrul gazului într-un proces ciclic? Argumentați răspunsul.
5. Gazul trece pe două căi diferite din starea 1, caracterizată de parametri $p_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ și $V_1 = 0,1 \text{ m}^3$, în starea 2, în care acești parametri sînt $p_2 = 10^5 \text{ Pa}$ și $V_2 = 0,4 \text{ m}^3$ (fig. 2.7). Calculați lucrul efectuat de gaz în aceste două procese.
6. O masă de gaz ce ocupă volumul $V_1 = 2 \text{ m}^3$ la presiunea $p_1 = 4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ efectuează ciclul reprezentat în figura 2.8. Care este lucrul gazului în acest ciclu, știind că presiunea $p_2 = 10^5 \text{ Pa}$?

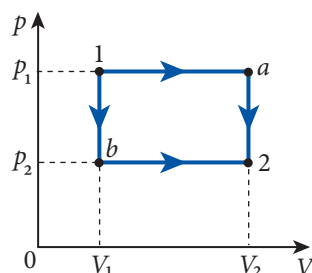


Fig. 2.7

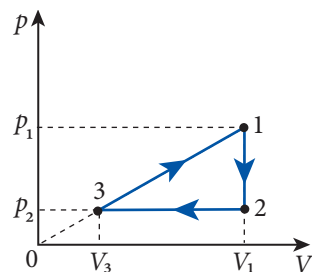


Fig. 2.8

2.3 CANTITATEA DE CĂLDURĂ. COEFICIENȚII CALORICI

Să analizăm o altă modalitate de variație a energiei interne a unui sistem termodinamic. Admitem că un corp solid A , aflat la temperatura T_A , este introdus într-un vas cu lichid, a cărui temperatură T_B este mai joasă, $T_B < T_A$ (fig. 2.9). Întreaga suprafață a corpului solid vine în contact cu lichidul. În procesul mișcării termice, moleculele dintr-o parte a suprafeței de contact se ciocnesc cu moleculele din cealaltă parte a ei, din vecinătatea acesteia. Temperatura corpului solid este mai înaltă decât a lichidului, deci moleculele solidului au energii cinetice de translație mai mari decât moleculele

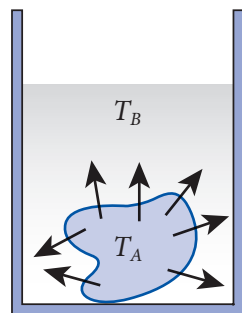


Fig. 2.9

lichidului. La ciocniri moleculele solidului transmit o parte din energia lor cinetică moleculelor lichidului. Astfel, prin suprafața de separație solid-lichid are loc un transfer de energie, o parte din energia internă a corpului solid este transmisă lichidului ce-l înconjoară.

Această modalitate de transmisie a energiei interne de la un corp la altul, de asemenea sub formă de energie internă, se numește **schimb de căldură**, iar cantitatea de energie transmisă prin schimb de căldură a fost numită **cantitate de căldură**.

Din cele expuse mai sus rezultă că schimbul de căldură are loc numai în cazul în care corpurile aflate în contact au temperaturi diferite. Odată cu egalarea temperaturilor se egalează și energiile cinetice medii de translație a moleculelor, iar schimbul de căldură încetează. Sistemul de corpuri trece în starea de echilibru termic și temperatura în diferite regiuni ale lui are aceeași valoare.

Astfel, există două modalități de variație a energiei interne a unui sistem: prin efectuarea unui lucru mecanic și prin schimb de căldură. În primul caz este necesar ca volumul sistemului să varieze, iar în al doilea caz nu este necesară această variație. Pentru a înțelege deosebirea principială dintre aceste două modalități, se va apela la concepțiile cinetico-moleculare. Atunci când gazul se dilată și efectuează lucrul mecanic, particulele din componența pistonului și a corpurilor de pe el (fig. 2.1) se mișcă în același sens, vertical în sus, adică au o mișcare ordonată. Prin urmare, efectuarea lucrului mecanic pe seama energiei interne este caracterizată de transformarea energiei mișcării haotice a moleculelor gazului în energia mișcării orientate a pistonului, sau invers, în cazul lucrului negativ al gazului. În cazul schimbului de căldură (fig. 2.9), energia mișcării haotice a moleculelor unui corp (a corpului solid A) se transmite, ca energie a mișcării de asemenea haotice a moleculelor lichidului ce-l înconjoară. Se constată două modalități esențial diferite, din punct de vedere cinetico-molecular, de variație a energiei interne.

Cantitatea de căldură se notează cu Q . Unitatea acesteia este aceeași ca și a energiei, adică 1 J^* . Prin convenție, cantitatea de căldură primită de sistem este considerată pozitivă ($Q_{\text{prim.}} > 0$), iar cea cedată – negativă ($Q_{\text{ced.}} < 0$).

Să examinăm un proces ciclic. Pe unele porțiuni ale acestuia sistemul supus procesului primește căldură, pe alte porțiuni el cedează căldură. Notăm cu $Q_{\text{prim.}}$ suma tuturor căldurilor primite, iar cu $Q_{\text{ced.}}$ suma tuturor căldurilor cedate pe parcursul procesului ciclic. Atunci $Q_{\text{cicl.}} = Q_{\text{prim.}} + Q_{\text{ced.}}$. Introducem valorile absolute: $|Q_{\text{prim.}}| = Q_1$ și $|Q_{\text{ced.}}| = Q_2$. Ținând seama de convenția privind semnele, avem $Q_{\text{prim.}} = Q_1$ și $Q_{\text{ced.}} = -Q_2$.

Pentru cantitatea de căldură cu care sistemul face schimb cu mediul înconjurător pe parcursul unui ciclu avem:

$$Q_{\text{cicl.}} = Q_{\text{prim.}} + Q_{\text{ced.}} = Q_1 - Q_2. \quad (2.15)$$

* Mai există o unitate veche pentru unitatea de căldură – **caloria** (din lat. *calor* „căldură”; $1 \text{ cal} = 4,1855 \text{ J}$). În prezent se utilizează în industria alimentară și în tehnică.

Din clasa a VIII-a cunoaștem relația dintre cantitatea de căldură transmisă corpului omogen și variația temperaturii lui:

$$Q = mc(t_2 - t_1). \quad (2.16)$$

Aici c este **căldura specifică** a substanței din care este confecționat corpul de masă m , iar $(t_2 - t_1)$ este variația temperaturii corpului. Dar $(t_2 - t_1) = (T_2 - T_1) = \Delta T$, deoarece variația temperaturii în grade Celsius sau în kelvini este aceeași. Avem:

$$Q = mc\Delta T, \quad (2.17)$$

de unde

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}, \quad (2.18)$$

deci:

Căldura specifică a substanței este egală cu raportul dintre cantitatea de căldură primită de corpul din această substanță și produsul masei lui la variația temperaturii.

Unitatea căldurii specifice: $[c] = \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

La calcularea cantității de căldură transmise gazelor este mai lesne de folosit **căldura molară**, definită de relația:

$$C_M = \frac{Q}{\nu \cdot \Delta T}, \quad (2.19)$$

deci:

Căldura molară este egală cu raportul dintre cantitatea de căldură transmisă substanței și produsul cantității de substanță cu variația temperaturii.

Unitatea căldurii molare: $[C_M] = \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$.

Cantitatea de căldură este:

$$Q = \nu C_M \Delta T = \frac{m}{M} C_M \Delta T. \quad (2.20)$$

Între căldura molară și cea specifică există o relație simplă, care rezultă din comparația formulelor (2.17) cu (2.20) sau (2.18) cu (2.19):

$$C_M = cM. \quad (2.21)$$

Uneori se folosește așa-numita **capacitate calorică (termică) a corpului**:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}, \quad (2.22)$$

egală cu raportul dintre cantitatea de căldură transmisă corpului și variația temperaturii lui. Unitatea ei: $[C] = \text{J}/\text{K}$, iar cantitatea de căldură este dată de expresia:

$$Q = C\Delta T. \quad (2.23)$$

Comparînd expresia (2.23) cu (2.17) și (2.20), pentru un corp omogen obținem:

$$C = mc = \nu C_M. \quad (2.24)$$

Mărimile c , C_M și C se numesc **coeficienți calorici**. Pentru căldura specifică și cea molară putem formula și alte definiții:

Căldura specifică este numeric egală cu capacitatea calorică a 1 kg de substanță, iar căldura molară este numeric egală cu capacitatea calorică a unui mol de substanță.

1. Descrieți mecanismul prin care se realizează schimbul de căldură dintre două corpuri ce se află în contact.
2. Care este condiția necesară pentru ca între două corpuri aflate în contact să existe schimb de căldură?
3. Care este deosebirea esențială dintre cele două modalități de variație a energiei interne: prin efectuarea lucrului mecanic și prin schimb de căldură?
4. În ce caz cantitatea de căldură este negativă? Dar pozitivă?
5. Cum se definește căldura molară a substanței? Care este relația ei cu căldura specifică?
6. Unui corp din aluminiu cu masa $m = 1,5 \text{ kg}$ s-a transmis o cantitate de căldură $Q = 68,7 \text{ kJ}$. Până la ce temperatură s-a încălzit corpul, dacă temperatura inițială a lui a fost $t_1 = 23^\circ\text{C}$? Căldura specifică a aluminiului $c = 900 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.
7. Care este capacitatea calorică a unui sistem constituit din două corpuri omogene de mase m_1 și m_2 , ale căror călduri specifice sînt egale cu c_1 și, respectiv, c_2 ?

2.4 PRINCIPIUL ÎNTÎI AL TERMODINAMICII ȘI APLICAREA LUI LA DIFERITE PROCESE

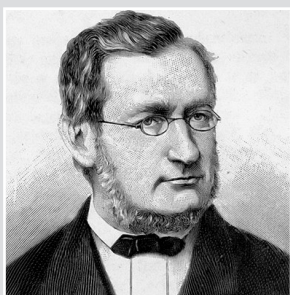
a. Principiul întâi al termodinamicii

Din mecanică știm că energia mecanică a unui sistem izolat de corpuri rămîne constantă dacă în acesta acționează numai forțe conservative. Dacă însă în sistem acționează forțe neconservative, atunci energia mecanică a lui se micșorează în timp. Pe de altă parte, se știe că în urma frecării corpurile se încălzesc. Pe această cale încă în Antichitate omul obținea focul (fig. 2.10). Pe timp de iarnă, pentru a ne încălzi, frecăm intens mîinile degerate una de alta. Aceste observații și multe altele arată că la frecare lucrul mecanic contribuie la mărirea energiei interne a corpurilor ce se află în contact. Cu alte cuvinte, micșorarea energiei mecanice a corpurilor ce constituie un sistem izolat în care acționează forțe neconservative este însoțită de creșterea energiei interne a corpurilor din sistem.



Fig. 2.10

Legitățile care permit descrierea cantitativă a transformărilor de acest gen au fost stabilite în anii '40 ai secolului al XIX-lea în cercetările realizate de fizicianul german Julius Robert Mayer, fizicianul englez James Joule și fizicianul german Hermann Helmholtz. Pe baza lor a fost formulată legea conservării și transformării energiei, care include și fenomenele termice, cunoscută în prezent sub denumirea de **principiul întâi al termodinamicii**.



Observările sale asupra culorii singelui marinarilor, diferită în regiunile tropicale față de cele nordice, i-au sugerat ideea despre existența unei legături dintre căldură și lucrul mecanic. A efectuat cercetări corespunzătoare în domeniul fizicii.

A determinat echivalentul mecanic al căldurii – relația dintre unitățile de lucru și de căldură, care în acele timpuri erau diferite.

A stabilit relația dintre căldurile molare ale gazelor la presiune și la volum constant (*relația lui Mayer*). J.R. Mayer a formulat legea conservării și transformării energiei.

În conformitate cu acest principiu, energia internă a unui sistem de corpuri variază numai în urma schimbului de energie cu corpurile din jur, care se poate realiza pe două căi: prin schimb de căldură și prin efectuarea unui lucru mecanic. Putem concluziona că:

Variația energiei interne a unui sistem macroscopic este egală cu cantitatea de căldură primită de sistem plus lucrul mecanic efectuat asupra acestuia de corpurile din exteriorul sistemului.

Adică:

$$\Delta U = Q + L' \quad (2.25)$$

Deoarece în practică se pune problema obținerii lucrului pe seama energiei interne, modificăm relația (2.25), trecând în ea la lucrul L efectuat de sistem. Luând în considerare relația (2.13), avem $L' = -L$, ceea ce permite transcrierea expresiei (2.25) sub forma $\Delta U = Q - L$ sau

$$Q = \Delta U + L \quad (2.26)$$

Cantitatea de căldură primită de sistem este egală cu suma dintre variația energiei interne a sistemului și lucrul mecanic efectuat de acesta asupra corpurilor exterioare.

Relația (2.25) sau (2.26) și enunțul corespunzător exprimă **principiul întâi al termodinamicii**. Acesta este un principiu general, aplicabil la orice sistem de corpuri.

Variația energiei interne a unui sistem nu depinde de procesul de trecere a sistemului dintr-o stare în alta, dar lucrul gazului depinde de acest proces. Cantitatea de căldură, ca sumă a celor două mărimi, depinde de procesul de trecere între stările examinate, deci **cantitatea de căldură este mărime de proces**, ca și lucrul gazului.

Aplicăm acest principiu la un sistem care efectuează un proces ciclic. Din (2.26) avem $Q_{\text{cicl.}} = \Delta U_{\text{cicl.}} + L_{\text{cicl.}}$. Mai sus s-a stabilit că variația energiei interne într-un proces ciclic (2.5) este egală cu zero, iar cantitatea de căldură în același proces (2.15) este dată de expresia $Q_{\text{cicl.}} = Q_1 - Q_2$.

Astfel, lucrul mecanic:

$$L_{\text{cicl.}} = Q_1 - Q_2, \quad (2.27)$$

adică lucrul sistemului într-un proces ciclic este egal cu diferența dintre căldura primită din exterior și valoarea absolută a căldurii cedate pe parcursul ciclului.

b. Aplicarea principiului întâi al termodinamicii la transformările simple ale gazului ideal

Să analizăm transformările simple ale gazului ideal din punctul de vedere al transformărilor energetice care au loc în ele. În acest scop, evocăm toate expresiile necesare:

$$\text{principiul întâi} \quad Q = \Delta U + L; \quad (2.26)$$

$$\text{cantitatea de căldură} \quad Q = \nu C_M \Delta T; \quad (2.20)$$

$$\text{variația energiei interne} \quad \Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T; \quad (2.11)$$

$$\text{lucrul efectuat de gaz} \quad L = p \Delta V; \quad (2.12)$$

$$\text{ecuația termică de stare} \quad pV = \nu RT. \quad (2.28)$$

Transformarea izocoră ($V = \text{const.}, \Delta V = 0$). Din (2.12) rezultă că lucrul gazului în această transformare este nul. Din (2.26) avem:

$$Q_V = \Delta U_V. \quad (2.29)$$

Indicele mărimilor fizice (în cazul de față, indicele V) arată parametrul care rămîne constant în transformarea respectivă.

Astfel, **în transformarea izocoră cantitatea de căldură transmisă sistemului este egală cu variația energiei sale interne.**

Substituim relațiile (2.20) și (2.11) în (2.29):

$$\nu C_{MV} \Delta T = \frac{3}{2} \nu R \Delta T.$$

De aici exprimăm căldura molară a gazului ideal monoatomic la volum constant:

$$C_{MV} = \frac{3}{2} R. \quad (2.30)$$

Această relație arată că **toate gazele ideale monoatomice au călduri molare la volum constant egale**. Rezultatul obținut este valabil și pentru toate gazele ideale biatomice, care au însă o altă valoare a căldurii molare la volum constant. De asemenea, gazele ideale formate din molecule ce conțin trei sau mai mulți atomi au călduri molare la volum constant egale între ele, dar cu o altă valoare.

Aici **se observă comoditatea utilizării căldurilor molare – ele nu depind de natura gazului, ci doar de numărul de atomi din moleculele lui.**

Ținînd seama de expresia (2.30), relația (2.11) ia forma

$$\Delta U = \nu C_{MV} \Delta T. \quad (2.31)$$

Transformarea izotermă ($T = \text{const.}, \Delta T = 0$). Din (2.11) sau (2.31) rezultă că energia internă a gazului ideal în această transformare rămîne constantă, astfel revenind la legea lui Joule. Din (2.26) obținem:

$$Q_T = L_T. \quad (2.32)$$

În transformarea izotermă cantitatea de căldură primită de gazul ideal este egală cu lucrul efectuat de acesta.

Formularea dată corespunde dilatării izoterme. În cazul comprimării izoterme, transformarea energiei are loc în sens invers – lucrul efectuat de corpurile exterioare este egal cu valoarea absolută a cantității de căldură cedate.

Graficul izotermei în coordonatele p , V reprezintă o hiperbolă, iar lucrul gazului este numeric egal cu aria de sub ea (fig. 2.11) și poate fi calculat prin determinarea aproximativă a acestei arii. Pentru a deduce formula lucrului, trebuie aplicate metodele din matematica superioară.

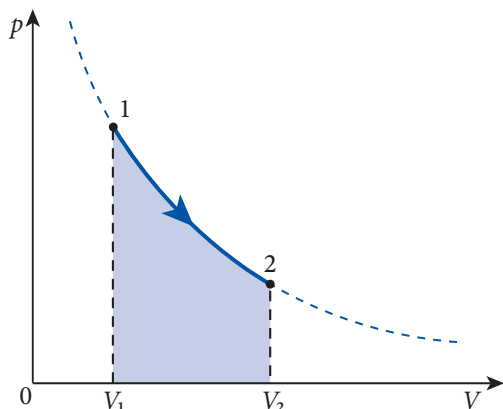


Fig. 2.11

Transformarea izobară ($p = \text{const.}$, $\Delta p = 0$). Toți termenii din relația (2.26) sînt diferiți de zero. Cantitatea de căldură primită de gazul ideal se consumă parțial pentru mărirea energiei lui interne, restul – pentru efectuarea lucrului mecanic (fig. 2.12).

Lucrul gazului în procesul izobar este dat de relația (2.14): $L_p = p(V_2 - V_1)$. Conform ecuației termice de stare, $pV_1 = \nu RT_1$ și $pV_2 = \nu RT_2$, astfel că expresia pentru lucru devine:

$$L_p = \nu R(T_2 - T_1) = \nu R\Delta T. \quad (2.33)$$

Această relație ne permite să stabilim sensul fizic al constantei universale a gazelor R . Din (2.33) rezultă că pentru $\nu = 1$ mol și $\Delta T = 1$ K lucrul L_p este numeric egal cu R . Prin urmare,

constanta universală a gazelor R este numeric egală cu lucrul efectuat de 1 mol de gaz ideal la încălzirea izobară a acestuia cu 1 K.

Substituim expresiile (2.20), (2.31) și (2.33) în relația (2.26). Obținem:

$$\nu C_{Mp} \Delta T = \nu C_{MV} \Delta T + \nu R \Delta T,$$

de unde rezultă:

$$C_{Mp} = C_{MV} + R. \quad (2.34)$$

Această relație dintre căldurile molare ale gazului ideal la presiune constantă C_{Mp} și la volum constant C_{MV} se numește **relația lui Mayer**. Căldura molară a gazului ideal la presiune constantă este cu R mai mare decît căldura molară la volum constant.

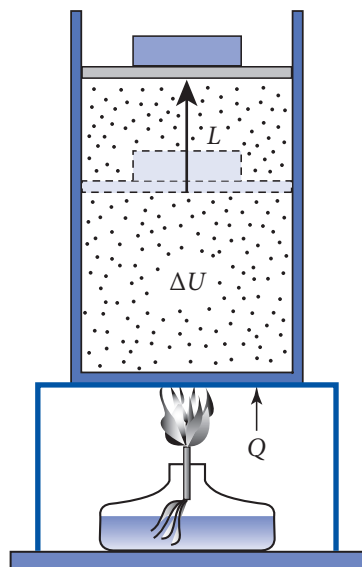


Fig. 2.12

Această relație este valabilă nu numai pentru gazul monoatomic, ci și pentru orice gaz ideal cu orice număr de atomi în moleculă.

Observăm că $C_{Mp} > C_{MV}$, ceea ce se explică prin faptul că la încălzirea izocoră toată căldura primită se consumă pentru mărirea energiei interne, în timp ce la încălzirea izobară o parte din căldura primită se consumă pentru efectuarea unui lucru mecanic și o altă parte, pentru creșterea energiei interne, deci și a temperaturii T .

Relația dintre căldura molară C_M și cea specifică c este dată de formula (2.21): $C_M = cM$. Trecând în (2.34) la căldurile lor specifice, obținem relația lui Mayer pentru acestea:

$$c_p = c_v + \frac{R}{M}. \quad (2.34, a)$$

Transformarea adiatică* ($Q = 0$). Este transformarea în care sistemul nu schimbă căldura cu mediul exterior – nici nu primește, nici nu cedează. Sistemul nu face schimb de căldură dacă este înconjurat de un **înveliș termoizolant**, numit și **înveliș adiatic**. În practică sînt considerate adiabatice transformările ce au loc în intervale de timp de scurtă durată, pe parcursul cărora sistemul nu reușește să schimbe căldura cu mediul înconjurător.

Pentru procesul adiatic, din relația generală (2.26) rezultă:

$$L_{ad.} = -\Delta U, \quad (2.35)$$

adică lucrul gazului în procesul adiatic este efectuat pe seama energiei sale interne.

Avînd în vedere expresiile (2.12) și (2.31), transcriem ultima relație sub forma:

$$p\Delta V = -\nu C_{MV}\Delta T. \quad (2.36)$$

Variația volumului ΔV și variația temperaturii ΔT au semne opuse. Rezultă că la dilatarea adiatică ($\Delta V > 0$) gazul se răcește ($\Delta T < 0$) și, invers, la comprimarea adiatică gazul se încălzește. De acest lucru ne convingem efectuînd experimente simple. Un balon de sticlă (sau o butelie de plastic) este prevăzut cu un dop prin care trece un tub unit cu o pompă de aer (fig. 2.13). Dacă aerul din cameră este uscat, introducem în balon cîteva picături de apă, apoi îl astupăm astfel încît dopul să poată fi scos ușor. Pompăm aer în balon și, la un anumit moment, dopul sare. Observăm că în balon se formează ceață, ceea ce arată că la dilatarea adiatică a aerului din el temperatura acestuia a coborît sub punctul de rouă.

Un cilindru de sticlă organică transparentă are un canal în care se poate deplasa un piston etanș legat printr-o tijă cu un mîner (fig. 2.14). Plasăm la fundul tubului puțină vată uscată, pe care este presărat sulfurul de la gămlăile a 1-2 chibrituri. Așezăm pistonul în partea superioară a cilindrului, apoi lovim brusc mînerul. Aerul se comprimă și observăm că sulfurul și vata se aprind, ceea ce arată că la comprimarea

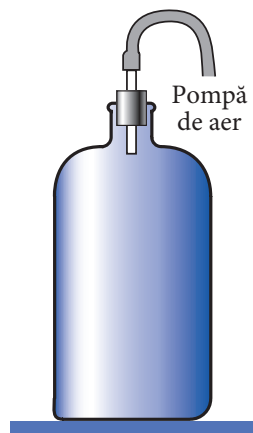


Fig. 2.13

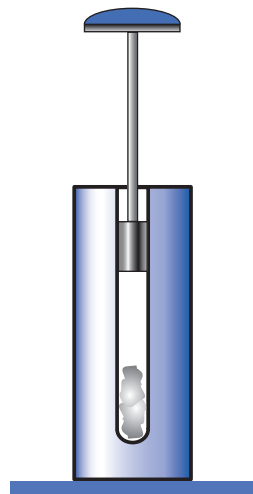


Fig. 2.14

adiabatică temperatura aerului a crescut, devenind mai mare decât temperatura la care sulful se aprinde.

Variația temperaturii gazului ideal la transformarea adiabatică poate fi explicată în cadrul teoriei cinetico-moleculare. În acest scop, considerăm ciocnirea perfect elastică a moleculei cu pistonul masiv care se deplasează cu viteza \vec{u} perpendiculară pe suprafața lui. Pentru simplitate, admitem că viteza moleculei pînă la ciocnire \vec{v}_0 , deci și viteza ei \vec{v} de după ciocnire sînt perpendiculare pe suprafața pistonului (fig. 2.15).

Din mecanică (par. 4.9, b) cunoașteți că la ciocnirea perfect elastică a unei bile ce cade normal pe un perete aflat în repaus și a cărui masă este mult mai mare decât a bilei, viteza acesteia își schimbă sensul, rămînînd aceeași în mod \ulcorner .

Aplicăm acest rezultat la ciocnirea perfect elastică a moleculei cu pistonul mobil. În sistemul de referință legat de piston viteza moleculei (viteza relativă) înainte de ciocnire este egală cu $(\vec{v}_0 - \vec{u})$, iar după ciocnire – cu $(\vec{v} - \vec{u})$. Aceste două viteze relative sînt egale în mod \ulcorner și au sensuri contrare, adică $(\vec{v} - \vec{u}) = -(\vec{v}_0 - \vec{u})$. De aici exprimăm viteza moleculei după ciocnire $\vec{v} = -\vec{v}_0 + 2\vec{u}$.

Pentru proiecția pe axa x a vitezei \vec{v} în cazul cînd pistonul se îndepărtează (fig. 2.15, a), avem $v_a = v_0 - 2u$, iar cînd acesta se deplasează în întîmpinarea moleculei (fig. 2.15, b), avem $v_b = v_0 + 2u$.

Astfel, la ciocnirea perfect elastică a moleculei cu pistonul ce se îndepărtează de ea (la dilatare) viteza moleculei se micșorează, $v_a < v_0$, iar cu pistonul ce se apropie de ea (la comprimare) viteza moleculei se mărește, $v_b > v_0$. Acest rezultat este valabil și în cazul ciocnirilor oblice ale moleculelor, cînd componentele vitezelor paralele cu suprafața pistonului rămîn invariabile, iar cele normale se modifică ca în cazul analizat mai sus.

Această micșorare a vitezelor moleculelor la dilatarea adiabatică a gazului ideal și mărirea lor la comprimarea adiabatică este însoțită de variația corespunzătoare a energiilor cinetice ale moleculelor, deci și a energiei interne a gazului ideal, respectiv, și a temperaturii lui.

Menționăm că în cazul dilatării sau comprimării izoterme, variația respectivă a energiei interne a gazului ideal este compensată de cantitatea de căldură primită de la mediul exterior sau cedată acestuia, astfel încît energia internă a gazului, deci și temperatura lui rămîn invariabile.

Curba care reprezintă grafic transformarea adiabatică se numește **adiabată**. Să construim adiabata pe diagrama p, V . Pentru comparație construim mai întîi o izotermă. Din ecuația termică de stare (2.28), presiunea gazului $p = \frac{\nu RT}{V}$. La dilatarea

izotermă, presiunea gazului se micșorează numai datorită creșterii volumului, în timp ce la dilatarea adiabatică presiunea se reduce atît din cauza creșterii volumului, cît și din cauza micșorării temperaturii gazului. Deci la dilatarea adiabatică presiunea gazului scade mai rapid decât la dilatarea izotermă și adiabata se află sub izotermă (fig. 2.16, a). La comprimarea adiabatică, presiunea gazului crește mai rapid decât

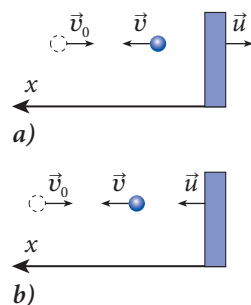


Fig. 2.15

la comprimarea izotermă, adiabata aflându-se deasupra izotermei (fig. 2.16, b).

După cum cunoașteți, presiunea gazului ca funcție de volum într-o transformare izotermă este dată de legea Boyle–Mariotte (1.18), $pV =$

$= \text{const.}$ O relație similară pentru presiunea gazului într-o transformare adiatică în funcție de volumul său a fost stabilită de matematicianul și fizicianul francez Denis-Siméon Poisson (1781–1840). Reieșind din relația (2.36) și folosind ecuația Clapeyron–Mendeleev, el a obținut formula

$$pV^\gamma = \text{const.}, \quad (2.37)$$

cunoscută sub numele de **ecuația lui Poisson**. În această ecuație exponenta volumului se numește **indice al adiabatei**:

$$\gamma = \frac{C_{Mp}}{C_{MV}}. \quad (2.38)$$

Din relația lui Mayer (2.34) rezultă că $C_{Mp} > C_{MV}$, deci $\gamma > 1$. Pentru $\gamma > 1$, mărimea V^γ variază mai rapid decât volumul V . Prin urmare, și presiunea gazului în transformarea adiatică (2.37) variază mai rapid decât în procesul izoterm, ceea ce a fost stabilit mai sus pe altă cale.

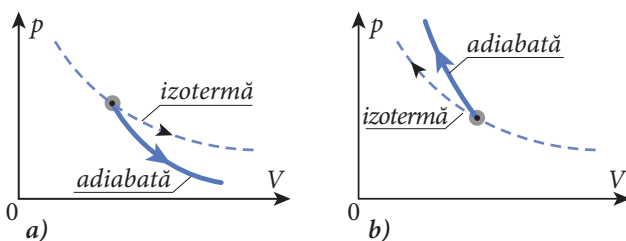


Fig. 2.16

Problemă rezolvată

1

Se dă:

$p_1 = 4 \cdot 10^5 \text{ Pa},$
 $V_1 = 10 \text{ L},$
 $p_2 = 2p_1 \text{ (} V_1 - \text{const.)},$
 $V_3 = 4V_2 \text{ (} p_2 - \text{const.)}$
 $Q - ?$

SI:

10^{-2} m^3

J

Un gaz ideal monoatomic se află în starea inițială caracterizată de parametrii $p_1 = 4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ și $V_1 = 10 \text{ L}$. În urma comunicării unei cantități de căldură, gazul mai întâi își dublează presiunea la volum constant, după care se dilată la presiune constantă pînă la un volum de 4 ori mai mare decât cel inițial. Reprezentați acest proces în coordonatele p, V și calculați cantitatea de căldură comunicată gazului.

Rezolvare

Procesul analizat în această problemă constă dintr-o izocoră și o izobară, care este reprezentat în figura 2.17.

Cantitatea de căldură comunicată gazului se compune din cantitățile de căldură la trecerea lui din starea 1 în starea 2 – Q_{12} și din starea 2 în starea 3 – Q_{23} :

$$Q = Q_{12} + Q_{23}.$$

Transformarea $1 \rightarrow 2$ este izocoră și în conformitate cu (2.29) – (2.31)

$$Q_{12} = \Delta U = \frac{3}{2} \nu R (T_2 - T_1).$$

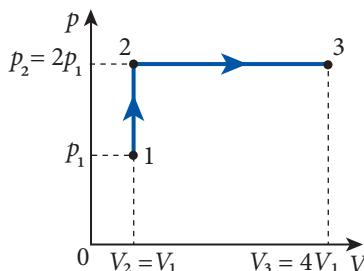


Fig. 2.17

Pentru determinarea temperaturii gazului în starea 2, folosim legea transformării izocore:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \text{ sau } \frac{T_2}{T_1} = \frac{2p_1}{p_1} = 2, \text{ de unde } T_2 = 2T_1.$$

Folosind ecuația de stare $p_1 V_1 = \nu RT_1$ pentru Q_{12} , avem:

$$Q_{12} = \frac{3}{2} \nu R(2T_1 - T_1) = \frac{3}{2} \nu RT_1 = \frac{3}{2} p_1 V_1.$$

Transformarea $2 \rightarrow 3$ este izobară și conform principiului întâi al termodinamicii

$$Q_{23} = \Delta U_{23} + L_{23},$$

unde $L_{23} = p_2(V_3 - V_2) = 2p_1(4V_1 - V_1) = 6p_1 V_1$ reprezintă lucrul efectuat de gaz în transformarea izobară $2 \rightarrow 3$, iar $\Delta U_{23} = \frac{3}{2} \nu R(T_3 - T_2)$ este variația energiei interne în această trans-

formare. Pentru determinarea temperaturii T_3 , folosim legea transformării izobare:

$$\frac{V_3}{T_3} = \frac{V_2}{T_2} \text{ sau } \frac{T_3}{2T_1} = \frac{4V_1}{V_1}, \text{ de unde } T_3 = 8T_1.$$

Astfel, $\Delta U_{23} = \frac{3}{2} \nu R \cdot (8T_1 - 2T_1) = 9\nu RT_1 = 9p_1 V_1$, iar $Q_{23} = 9p_1 V_1 + 6p_1 V_1 = 15p_1 V_1$.

Așadar, cantitatea de căldură comunicată gazului în procesul $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$:

$$Q = 1,5p_1 V_1 + 15p_1 V_1 = 16,5p_1 V_1; Q = 66 \text{ kJ}.$$

Problemă rezolvată

2

Se dă:

$V_1 = 1 \text{ L}$,
 $T_1 = 300 \text{ K}$,
 $m = 20 \text{ kg}$,
 $S = 100 \text{ cm}^2$,
 $Q = 90 \text{ J}$,
 $\Delta T = 100 \text{ K}$,
 $p_0 = 10^5 \text{ Pa}$,
 $g \approx 10 \text{ m/s}^2$

SI:

10^{-3} m^3

10^{-2} m^2

Într-un cilindru vertical prevăzut cu un piston se află un gaz ideal cu volumul $V_1 = 1 \text{ L}$ și temperatura $T_1 = 300 \text{ K}$. Masa pistonului este de 20 kg , iar aria suprafeței lui $S = 100 \text{ cm}^2$. În urma transmiterii gazului a cantității de căldură de 90 J , acesta și-a mărit temperatura cu 100 K . Considerînd forța de frecare dintre piston și pereții cilindrului neglijabilă, determinați cu cît variază energia internă a gazului. Presiunea atmosferică se va considera normală $p_0 = 10^5 \text{ Pa}$, iar accelerația gravitațională $g \approx 10 \text{ m/s}^2$.

$\Delta U - ?$

J

Rezolvare

Observăm că forțele de presiune ale atmosferei și pistonului sînt constante și presiunea exercitată asupra gazului tot este constantă. Rezultă că presiunea gazului nu se modifică și procesul de încălzire și dilatare a gazului are loc la presiune constantă. Așadar, în conformitate cu principiul întâi al termodinamicii

$$\Delta U = Q - L.$$

Conform (2.12), lucrul efectuat de gaz este

$$L = p(V_2 - V_1),$$

unde $p = p_0 + \frac{mg}{S}$ reprezintă presiunea gazului egală cu suma dintre presiunea atmosferică

și cea creată de piston, iar variația volumului poate fi determinată cu ajutorul legii transformării izobare. Într-adevăr,

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}, \text{ unde } T_2 = T_1 + \Delta T \text{ este temperatura finală. Prin urmare, avem:}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_1 + \Delta T}{T_1} = 1 + \frac{\Delta T}{T_1} \text{ sau } V_2 = V_1 \left(1 + \frac{\Delta T}{T_1} \right).$$

Așadar, pentru variația energiei interne a gazului, obținem:

$$\Delta U = Q - p(V_2 - V_1) = Q - \left(p_0 + \frac{mg}{S} \right) \left(\chi + \frac{\Delta T}{T_1} - \chi \right) V_1 = Q - \left(p_0 + \frac{mg}{S} \right) \frac{V_1}{T_1} \Delta T;$$

$$\Delta U = 50 \text{ J.}$$

Problemă rezolvată

3

Se dă:

$$\nu = 0,1 \text{ mol,}$$

$$V_1 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3,$$

$$p_1 = 16,62 \cdot 10^4 \text{ Pa,}$$

$$V_2/V_1 = 2,$$

$$T_1 = T_3$$

$$\Delta U_{12} - ?, L_{12} - ?, Q_{12} - ?;$$

$$\Delta U_{23} - ?, L_{23} - ?, Q_{23} - ?;$$

$$\Delta U_{123} - ?, L_{123} - ?, Q_{123} - ?$$

Un gaz ideal monoatomic în cantitate de $\nu = 0,1$ mol ocupă volumul $V_1 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ la presiunea $p_1 = 16,62 \cdot 10^4 \text{ Pa}$. În urma dilatării izobare, volumul gazului a crescut de două ori, apoi în urma dilatării adiabatice, temperatura gazului a coborât pînă la temperatura inițială. Determinați variația energiei interne, lucrul efectuat de gaz și cantitatea de căldură primită de el la transformarea izobară, la transformarea adiabatică și la transformarea constituită din ambele etape.

Rezolvare

Reprezentăm graficul procesului descris în problemă pe diagrama (p, V) . Temperatura T_3 este egală cu T_1 , deci stările 1 și 3 se află pe o izotermă (fig. 2.18). Calculăm parametrii stărilor gazului. Din ecuația termică de stare $pV = \nu RT$ exprimăm temperatura $T_1 = \frac{p_1 V_1}{\nu R}$; $T_1 = 300 \text{ K}$. Transformarea

1-2 este izobară și, conform legii lui Gay-Lussac, $\frac{V_2}{T_2} = \frac{V_1}{T_1}$, deci $T_2 = \frac{V_2}{V_1} T_1 = 2T_1 = 600 \text{ K}$. Variația energiei interne în transformarea 1-2 este egală cu $\Delta U_{12} = \frac{3}{2} \nu R(T_2 - T_1)$; $\Delta U_{12} = 374 \text{ J}$.

Lucrul gazului $L_{12} = p_1(V_2 - V_1)$; $L_{12} = 249 \text{ J}$. Cantitatea de căldură primită în transformarea izobară $Q_{12} = \nu C_{Mp}(T_2 - T_1)$. Conform ecuației lui Mayer, $C_{Mp} = C_{Mv} + R$. Căldura molară la volum constant a gazului ideal monoatomic $C_{Mv} = \frac{3}{2} R$, deci $C_{Mp} = \frac{5}{2} R$.

Avem $Q_{12} = \frac{5}{2} \nu R(T_2 - T_1)$; $Q_{12} = 623 \text{ J}$.

Cele trei mărimi care figurează în principiul întâi al termodinamicii au fost calculate în mod independent. Verificăm corectitudinea calculelor determinînd cantitatea de căldură $Q_{12} = \Delta U_{12} + L_{12}$; $Q_{12} = 374 \text{ J} + 249 \text{ J} = 623 \text{ J}$, rezultat care coincide cu cel de mai sus.

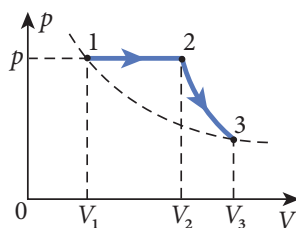


Fig. 2.18

Variația energiei interne în transformarea adiabatică 2–3 este egală cu $\Delta U_{23} = \frac{3}{2} \nu R (T_3 - T_2) = \frac{3}{2} \nu R (T_1 - T_2)$; $\Delta U_{23} = 374 \text{ J}$.

Lucrul gazului în procesul adiabatic $L_{23} = -\Delta U_{23} = 374 \text{ J}$.

Cantitatea de căldură primită $Q_{23} = 0$, în conformitate cu definiția procesului adiabatic.

Calculăm mărimile ce se referă la întregul proces 1–2–3. Variația energiei interne $\Delta U_{123} = \Delta U_{12} + \Delta U_{23}$. Acest rezultat putea fi obținut direct, ținând seama de faptul că energia internă este mărime

de stare: $\Delta U_{123} = \frac{3}{2} \nu R (T_3 - T_1) = 0$, deoarece $T_3 = T_1$. Lucrul gazului $L_{123} = L_{12} + L_{23} = 623 \text{ J}$,

iar cantitatea de căldură primită $Q_{123} = Q_{12} + Q_{23} = 623 \text{ J}$. Acest rezultat era de așteptat, deoarece variația energiei interne este nulă.

Problemă rezolvată 4

Se dă:

$\nu = 6 \text{ moli}$,

$T = aV^2$,

$T_1 = 300 \text{ K}$,

$T_2 = 600 \text{ K}$

$L - ? \quad Q - ?$

O cantitate de 6 moli ai unui gaz ideal monoatomic a fost încălzită astfel încât temperatura lui crește direct proporțional cu pătratul volumului de la 300 K pînă la 600 K. Determinați lucrul efectuat în acest caz și cantitatea de căldură comunicată gazului.

Rezolvare

Întrucît dependența dintre temperatură și volum nu este direct proporțională, transformarea nu este izobară și deci la încălzirea gazului se modifică de asemenea presiunea lui. În acest caz se poate utiliza ecuația lui Clapeyron (1.28):

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2},$$

unde, conform condiției problemei, temperaturile inițială și finală sînt $T_1 = aV_1^2$ și, corespunzător, $T_2 = aV_2^2$. Astfel, avem:

$$\frac{p_1 V_1}{aV_1^2} = \frac{p_2 V_2}{aV_2^2} \text{ sau } \frac{p_1}{V_1} = \frac{p_2}{V_2}, \text{ adică } p_1 V_2 = p_2 V_1.$$

Rezultă că în transformarea analizată presiunea este direct proporțională cu volumul. În coordonatele p, V ea are aspectul reprezentat în figura 2.19.

Deoarece lucrul efectuat la variația volumului gazului este egal cu aria figurii de sub graficul transformării, adică a trapezului cu bazele p_1 și p_2 , și înălțimea $V_2 - V_1$, obținem:

$$L = \frac{1}{2} (p_1 + p_2) (V_2 - V_1) = \frac{1}{2} (p_1 V_2 + p_2 V_2 - p_1 V_1 - p_2 V_1).$$

Folosind rezultatul obținut mai sus, anume $p_1 V_2 = p_2 V_1$, și ecuația Clapeyron–Mendeleev (1.30), potrivit căreia $p_1 V_1 = \nu R T_1$ și $p_2 V_2 = \nu R T_2$, pentru lucrul efectuat în această transformare obținem:

$$L = \frac{1}{2} \nu R (T_2 - T_1); L \approx 7,5 \text{ kJ}.$$

Conform principiului întâi al termodinamicii, cantitatea de căldură comunicată gazului

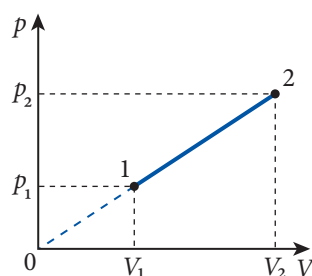


Fig. 2.19

$Q = \Delta U + L$. Deoarece gazul este monoatomic, atunci $\Delta U = \frac{3}{2}\nu R(T_2 - T_1)$. Astfel, pentru căldura comunicată gazului obținem:

$$Q = \frac{3}{2}\nu R(T_2 - T_1) + \frac{1}{2}\nu R(T_2 - T_1) = 2\nu R(T_2 - T_1); Q \approx 30 \text{ kJ}.$$

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. În care din transformările simple cantitatea de căldură primită de gazul ideal se consumă integral pentru efectuarea lucrului?
2. Cum se numește transformarea în care variația energiei interne a gazului este egală cu cantitatea de căldură?
- 3.*Care proces se numește adiabetic?
- 4.*Cu ce este egal lucrul efectuat de gaz într-o transformare adiabetică?
- 5.*Cum se modifică temperatura gazului ideal la comprimarea adiabetică?
6. Gazul ideal dintr-un vas a primit o cantitate de căldură $Q = 490 \text{ J}$ și, ca urmare, energia lui internă a crescut cu $\Delta U = 350 \text{ J}$. Cu ce este egal lucrul gazului în acest proces?
7. O masă de gaz ideal a fost transferată din starea inițială 1 în starea finală 2 de două ori: o dată pe calea 1a2, a doua oară – pe calea 1b2. În primul caz gazul a primit cantitatea de căldură $Q_a = 1\,800 \text{ J}$ și a efectuat un lucru $L_a = 1\,050 \text{ J}$. Ce lucru a efectuat gazul în cea de a doua transformare, dacă căldura primită este $Q_b = 2\,250 \text{ J}$?
8. Într-un vas etanș de volum $V = 0,2 \text{ m}^3$ se află gaz ideal monoatomic la presiunea $p = 2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Care va fi presiunea gazului după ce va primi cantitatea de căldură $Q = 45 \text{ kJ}$?
9. La încălzirea izobară a unui gaz la presiunea $p = 10^5 \text{ Pa}$ energia internă a lui s-a mărit cu $\Delta U = 9 \text{ kJ}$, iar volumul – cu $\Delta V = 0,06 \text{ m}^3$. Determinați lucrul efectuat de gaz și cantitatea de căldură primită.
10. Unui mol de gaz ideal la temperatura $T_1 = 310 \text{ K}$ i s-a transmis izobar o cantitate de căldură $Q_p = 1\,452,5 \text{ J}$. În consecință, energia internă a lui a crescut cu $\Delta U = 1\,037,5 \text{ kJ}$. Determinați temperatura finală a gazului. Se va lua $R = 8,3 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$.
11. Căldura specifică la volum constant a unui gaz este $c_v = 649,22 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, iar la presiune constantă $c_p = 908,91 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. Determinați care este acest gaz.

2.5 MOTOARE TERMICE. RANDAMENTUL

Motoarele termice sînt mașinile care transformă energia internă a combustibililor în energie mecanică. Ele au contribuit la progresul tehnic al industriei și transportului, au jucat și continuă să joace un rol important în viața omenirii.

În jumătatea a doua a secolului al XVII-lea, mai mulți ingineri din diferite țări au încercat să construiască mașini termice, în care lucrul mecanic ar fi efectuat de aburul în dilatare. În Anglia, inginerul de origine franceză Denis Papin (1647–1714) a fost primul care a propus, în 1690, utilizarea în acest scop a cilindrului cu piston. În cilindru, sub piston, se turna apă. La încălzire aceasta se evaporă și aburul obținut împreună cu aerul din cilindru ridicau pistonul. Pentru a-l aduce în stare inițială, cilindrul era răcit cu apă, vaporii din el se condensau, pistonul cobora în jos și ridica

corpuri printr-un sistem de scripete. Astfel se efectua un lucru mecanic. Mașina termică a lui Papin era ineficientă și nu a avut aplicare practică. Tot Papin a inventat cazanul de abur cu siguranță, în care putea fi obținut abur supraîncălzit.

În 1711, inventatorul englez Thomas Newcomen (1663–1729) a construit un motor termic mai avansat. Cazanul de abur a fost separat de cilindrul cu piston, din care cauză motoarele de acest gen au fost numite **motoare cu ardere externă**. Răcirea aburului avea loc în cilindru, ca la mașina lui Papin. Mașinile lui Newcomen au fost folosite la evacuarea apei din mine pe parcursul a circa 60 de ani.

Un **motor termic cu abur** mult mai evoluat, cu soluții constructive principale noi, a fost elaborat în 1784 de inventatorul englez James Watt (1736–1819), care a perfecționat mașina lui Newcomen.

Pe parcursul a peste 100 de ani, motoarele cu abur au fost principalele mașini utilizate în tehnică, apoi domeniul aplicării lor s-a micșorat treptat în urma invențării unor motoare mai avansate. Locomotive cu abur s-au utilizat până în anii '50 ai sec. XX. În prezent motoarele cu abur se întâlnesc la unele nave maritime.

a. Motoare cu ardere internă

Transmiterea aburului de la cazanul în care a fost obținut până la cilindru este însoțită de anumite pierderi de energie termică. Pierderile s-ar reduce considerabil dacă combustibilul ar arde în interiorul cilindrului. Evident, pentru aceasta pot fi utilizați anumiți combustibili (cărbunele nu poate arde în cilindru!). Astfel de combustibili, obținuți în urma prelucrării petrolului, sînt benzina și motorina.

Meritul principal în construirea primului motor cu ardere internă aparține inventatorului german Nikolaus Otto (1832–1891). Acesta, împreună cu inginerul german Eugen Langen (1833–1895), a creat în 1876 un motor cu ardere internă în patru timpi, cu combustibil gazos, iar în 1878 ei au realizat un motor performant care funcționa cu combustibil lichid (benzină).

Prin construcția sa, **motorul cu ardere internă** are unele elemente prezente la motorul cu abur: cilindrul cu piston, cuplul bielă-manivelă, arborele, dar are și elemente distincte: carburatorul în care se obține amestecul carburant de vapori de benzină și aer, bujia care produce scînteia electrică ce aprinde amestecul carburant și sistemul electric de alimentare a bujiei.

În figura 2.20 este reprezentată schema motorului cu ardere internă cu carburator (**motorul Otto**). Canalul 1 leagă spațiul cilindrului cu carburatorul, canalul 2 leagă același spațiu cu atmosfera, unde sînt eliminate produsele arderii combustibilului. Supapele (3) și (4) închid sau deschid aceste canale la momentele corespunzătoare. Bujia (5) produce scînteia electrică care aprinde amestecul carburant și temperatura în cilindru se ridică considerabil, iar gazele obținute, avînd presiune mare, pun în mișcare pistonul (6), care prin bielă (7) și manivelă (8) produce rotirea arborelui (9).

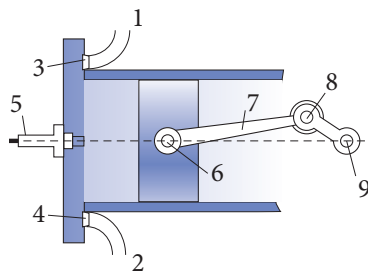


Fig. 2.20

Să analizăm funcționarea motorului și să construim diagrama respectivă (fig. 2.21). Deplasarea pistonului între pozițiile sale extreme se numește **timp**. Admitem că la momentul inițial pistonul se află în poziția limită din stânga (fig. 2.20), volumul cilindrului din partea respectivă este egal cu V_1 . Se deschide supapa de admisie (3), iar supapa de evacuare (4) este închisă. Pistonul (6) se mișcă spre dreapta pînă volumul devine egal cu V_2 . În cilindru pătrunde amestecul carburant la presiunea constantă p_1 , după care supapa (3) se închide. Acest timp este numit **admisie**, fiind reprezentat în diagramă (fig. 2.21) de izobara 1→2.

Urmează cel de-al doilea timp – **compresia adiabatică**. Ambele supape sînt închise, pistonul se mișcă spre stînga, volumul se micșorează de la V_2 pînă la V_1 , iar presiunea crește de la p_1 la p_2 . În diagramă, acestui timp îi corespunde adiabata 2→3. Urmează cel de-al treilea timp – prin scînteia produsă de bujie are loc **aprinderea** amestecului carburant, presiunea crește brusc de la p_2 pînă la p_3 , în timp ce volumul rămîne constant (izocora 3→4). Urmează **dilatarea adiabatică** 4→5 a gazelor fierbinți, volumul crește de la V_1 pînă

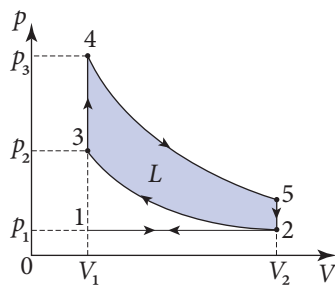


Fig. 2.21

la V_2 . Acest timp – aprinderea și dilatarea – este numit **cursă de lucru**. La sfîrșitul dilatării, la volumul V_2 se deschide supapa de evacuare 4 (fig. 2.20), presiunea în cilindru scade izocor pînă la p_1 – izocora 5→2. La mișcarea pistonului spre stînga pînă volumul devine egal cu V_1 are loc **evacuarea** produselor arderii din cilindru – izobara 2→1. Ciclul este închis. Izobarele 1→2 și 2→1 (timpii unu și patru) sînt auxiliare, pregătitoare pentru ciclul propriu-zis reprezentat de graficul 2→3→4→5→2.

Un alt motor cu ardere internă în patru timpi a fost patentat în 1887 și realizat în 1892 de inginerul german Rudolf Diesel (1858–1913). În acest motor combustibilul este introdus în cilindru de o pompă de injecție pulverizantă, iar aerul este introdus separat.

Să construim diagrama de funcționare (fig. 2.22) a acestui motor, numit **motor Diesel**. În primul timp, prin supapa de admisie în cilindru este absorbit aer (izobara 1→2), apoi în timpul următor acesta este comprimat adiabatic (curba 2→3). La sfîrșitul comprimării, temperatura lui este destul de ridicată. În acest timp, pompa de injecție începe pulverizarea în cilindru a picăturilor mici de motorină. Aceasta se aprinde și arde la presiune constantă, volumul aerului și al produselor arderii crescînd pînă la valoarea V_3 (izobara 3→4). Aici se întrerupe injectarea combustibilului și urmează dilatarea adiabatică 4→5 pînă la volumul maxim V_2 . Graficul 3→4→5 reprezintă cursa de lucru, cel de-al treilea timp de funcționare a motorului. Cînd volumul atinge valoarea maximă V_2 , se deschide supapa de evacuare, presiunea în cilindru scade brusc pînă la valoarea p_1 (izocora 5→2), apoi urmează mișcarea pistonului spre stînga și evacuarea produselor arderii (izobara 2→1). Ca și în orice alt ciclu, lucrul mecanic este numeric egal cu aria figurii mărginite de graficul ciclului (fig. 2.22).

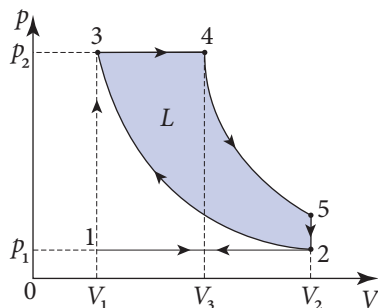


Fig. 2.22

Destul de frecvent se construiesc motoare cu ardere internă cu mai mulți cilindri. Prin intermediul mecanismelor bielă-manivelă este rotit un arbore comun, numit **arbore cotit**. Acesta este calculat în așa fel, încît cursa de lucru în cilindri să se producă continuu, alternînd de la un cilindru la altul. Pe această cale puterea motorului se mărește, iar rotația arborelui devine uniformă.

Motoarele cu ardere internă au o aplicare foarte largă în majoritatea domeniilor de activitate umană. Motoarele Otto (cu carburator) pun în mișcare automobile, avioane, elicoptere etc., iar motoarele Diesel se aplică pe larg la locomotive, tractoare, autocamioane de mare tonaj, la nave maritime etc.

b. Principiul de funcționare a motoarelor termice. Randamentul

În toate tipurile de motoare lucrul mecanic este efectuat de gaze, care se află la temperatură înaltă, deci produc presiune mare. Aceste gaze se numesc **agent de lucru**, fiind parte componentă a fiecărui motor termic.

O altă particularitate comună a motoarelor termice este periodicitatea funcționării lor. Mase noi de agent de lucru trec succesiv prin aceleași stări într-o ordine bine determinată. Agentul de lucru participă la o transformare ciclică, dilatîndu-se la temperaturi și presiuni mai ridicate și comprimîndu-se la temperaturi și presiuni mai joase.

Să analizăm schimburile de energie într-un ciclu.

La dilatare agentul de lucru primește o cantitate de căldură Q_1 la temperatură înaltă. Corpul (sau corpurile) care i-a transmis această cantitate de căldură este numit **încălzitor** sau **sursă caldă**.

În procesul de comprimare, agentul de lucru cedează o cantitate de căldură unui corp din jur (în particular, atmosferei), numit **răcitor** sau **sursă rece**. Vom nota valoarea absolută a cantității de căldură cedate la comprimare într-un ciclu cu Q_2 . Ca rezultat al cedării căldurii Q_2 , temperatura agentului de lucru se micșorează, comprimarea lui are loc la temperaturi și presiuni mai joase, astfel încît lucrul mecanic consumat pentru comprimarea agentului de lucru este mai mic decît lucrul efectuat de acesta la dilatare și lucrul în ciclu este pozitiv.

Din cele expuse mai sus rezultă că sursa caldă și cea rece sînt părți componente necesare pentru funcționarea unui motor termic. Fără una din ele, curba comprimării ar coincide cu cea a dilatării și lucrul motorului într-un ciclu ar fi nul.

Pentru lucrul efectuat de agentul de lucru într-un ciclu avem relația (2.27):

$$L = Q_1 - Q_2, \quad (2.39)$$

care este o consecință a principiului întîi al termodinamicii.

Totalizînd cele expuse mai sus, putem prezenta principiul funcționării motorului termic sub forma unei scheme (fig. 2.23). Aceasta conține elementele componente ale motorului: încălzitorul, agentul de lucru și răcitorul. Sînt indicate, de asemenea, cantitățile de căldură transmise și lucrul efectuat.

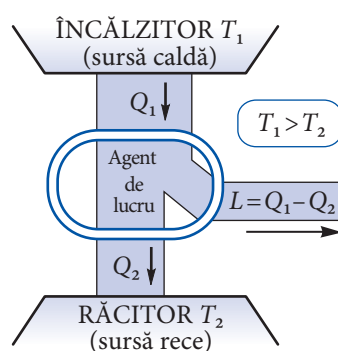


Fig. 2.23

Un motor termic funcționează cu atît mai eficient, cu cît el transformă în lucru mecanic o parte mai mare din cantitatea de căldură Q_1 primită de agentul de lucru de la încălzitor. Astfel, eficacitatea motorului termic este caracterizată de mărimea egală cu:

$$\eta = \frac{L}{Q_1} = \frac{(Q_1 - Q_2)}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}, \quad (2.40)$$

numită **randament**. Deoarece o cantitate de căldură Q_2 este transmisă sursei reci, randamentul ia valori $\eta < 1$. De obicei, randamentul se exprimă în procente.

Randamentele (exprimate în procente) ale diferitor motoare termice iau valorile următoare:

motoarele cu abur $\eta = 7 \div 15\%$

motoarele cu carburator (Otto) $\eta = 18 \div 24\%$

turbinele cu abur $\eta = 20 \div 25\%$

motoarele Diesel $\eta = 30 \div 39\%$

Una dintre problemele principale ale industriei constructoare de motoare este mărirea randamentelor acestora.

c.* Mașini frigorifice

Mașinile frigorifice – frigider, congelatoare, climatizoare etc. – permit obținerea unor temperaturi mai joase decît cea a mediului ambiant. Ele au o utilizare largă în industria alimentară, în transport, în comerț – la păstrarea calității alimentelor, îndeosebi a celor ușor alterabile, în medicină – la păstrarea medicamentelor și a diverselor preparate etc.

Să ne familiarizăm cu principiul de funcționare a unui frigider de uz casnic, anume a frigiderului cu compresie (fig. 2.24). Compresorul (1), acționat de motorul electric (2), impune circulația unui agent frigorific prin sistemul închis de țevi ale frigiderului. În calitate de astfel de agenți sînt utilizați, cel mai frecvent, freonii – clorfluorcarburi și hidroclorfluorcarburi – gaze ușor lichefiabile prin comprimare. Vaporii de freon din tubul 3 sînt pompați în tubul 4, unde presiunea lor crește și ei se condensează. Căldura latentă cedată de vaporii la condensare este transmisă mediului ambiant de freonul lichid la circulația lui prin sistemul de țevi (5) situate în partea din spate a frigiderului, în exteriorul lui. Prin orificiul îngust (tubul capilar) (6) freonul intră în vaporizatorul (7) situat în interiorul frigiderului. Aici presiunea este mult mai mică și freonul trece în stare gazoasă, are loc vaporizarea lui. Căldura latentă necesară vaporizării este luată de la corpurile aflate în frigider, astfel se produce răcirea acestora. Apoi vaporii de freon, prin tub (3), intră în compresor și procesul de răcire a corpurilor din frigider continuă. Pentru a menține în interiorul frigiderului un anumit regim de temperatură, alimentarea motorului compresorului

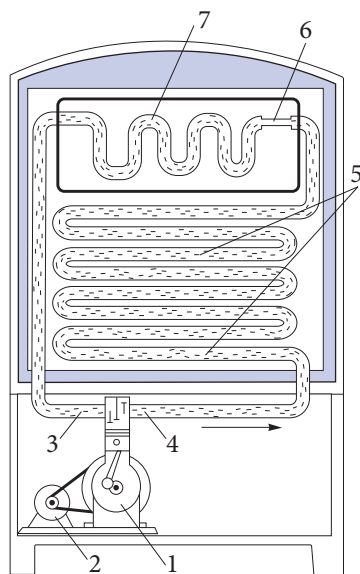


Fig. 2.24

cu curent electric este întreruptă pentru un timp de un releu, apoi motorul este pus în funcțiune din nou.

Frigiderul, ca și motoarele termice, are trei părți componente principale: agentul frigorific (freonul), răcitorul (corpurile din interiorul frigiderului) și încălzitorul (mediul ambiant). În timpul funcționării frigiderului, răcitorul cu temperatura mai joasă T_2 cedează o cantitate de căldură Q_2 agentului frigorific. Asupra acestuia este efectuat din exterior un lucru mecanic $L' = -L$ (lucrul mecanic L efectuat de agentul frigorific este negativ). Ca rezultat, agentul frigorific transmite încălzitorului, aflat la o temperatură mai înaltă T_1 , cantitatea de căldură a cărei valoare absolută este egală cu Q_1 . În conformitate cu principiul întâi al termodinamicii, aplicat la transformarea ciclică ce are loc în cazul frigiderului, avem $L = Q_2 - Q_1$ sau $L' = Q_1 - Q_2$, deci $Q_1 = Q_2 + L'$. Cantitatea de căldură transmisă încălzitorului este mai mare decât cea primită de la răcitor cu mărimea lucrului efectuat din exterior asupra agentului frigorific. Schema transformărilor energetice în frigider este reprezentată în figura 2.25.

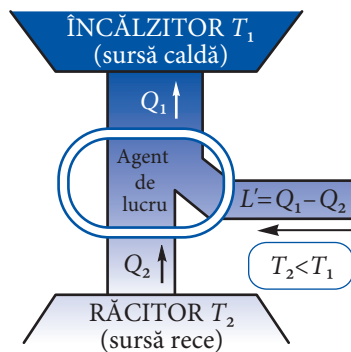


Fig. 2.25

Transformarea ciclică, la care este supus agentul frigorific, are loc în regiuni diferite ale sistemului închis de țevi prin care el circulă. În această transformare comprimarea agentului în tubul (4) are loc la o presiune, deci și temperatură mai înalte, iar dilatarea în vaporizatorul (7) – la presiune și temperatură mai joase. Prin urmare, diagrama de funcționare a frigiderului este un ciclu parcurs în sens antiorar (vezi fig. 2.5, b), când lucrul L efectuat de sistem este negativ, adică corpurile din exterior efectuează un lucru pozitiv $L' = -L$ asupra sistemului.

Eficacitatea funcționării unei mașini frigorifice este caracterizată de **coeficientul frigorific**, egal cu raportul dintre cantitatea de căldură Q_2 luată de la sursa rece într-un ciclu și lucrul mecanic L' consumat în acest timp

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{L'} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}. \quad (2.41)$$

Coeficientul frigorific poate lua valori și mai mari decât unitatea, adică, exprimat în procente, poate fi mai mare decât 100%.

Menționăm încă o modalitate de aplicare a mașinilor frigorifice, anume în calitate de **pompă termică**. Imaginați-vă o mașină frigorifică ce are vaporizatorul în afara încăperii, iar compresorul și sistemul de țevi cu freon comprimat în interiorul ei. Funcționarea acestei mașini frigorifice este însoțită de transportarea unei cantități de căldură Q_2 din exteriorul încăperii în interiorul ei și de transformarea concomitentă a lucrului consumat L' în căldură și transmiterea acesteia în interiorul încăperii. Astfel, încăperea primește o cantitate de căldură $Q_1 = Q_2 + L'$, care poate fi de câteva ori mai mare decât căldura degajată prin efect termic de curentul electric consumat la punerea mașinii frigorifice în funcțiune, adică pompa termică se dovedește a fi un sistem efektiv de încălzire a încăperilor. Ea se utilizează deja în țările scandinave și în unele țări occidentale.

Problemă rezolvată

Se dă:

$$n = \frac{Q_2}{L} = 4$$

η - ?

Cantitatea de căldură transmisă răcitorului de un motor termic pe parcursul unui ciclu este de 4 ori mai mare decât lucrul mecanic efectuat. Care este randamentul acestui motor termic?

Rezolvare

Randamentul motorului termic se calculează cu relația (2.40):

$$\eta = \frac{L}{Q_1},$$

unde Q_1 reprezintă cantitatea de căldură comunicată agentului de lucru, iar L este lucrul mecanic efectuat de agentul de lucru.

Conform (2.39), acesta se exprimă prin diferența cantităților de căldură Q_1 și Q_2 transmisă răcitorului:

$$L = Q_1 - Q_2,$$

de unde

$$Q_1 = L + Q_2 = L + nL.$$

Așadar, pentru randament obținem:

$$\eta = \frac{L}{(1+n)L} = \frac{1}{1+n}; \eta = 20\%.$$

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Prin ce diferă alimentarea motorului Diesel cu combustibil de alimentarea motorului Otto cu carburator?
2. Construiți diagrama de funcționare a motorului Otto. În care porțiune a ei agentul de lucru primește cantitatea de căldură Q_1 și în care cedează cantitatea de căldură Q_2 ?
3. Răspundeți la întrebarea 2 pentru cazul motorului Diesel.
4. Care sînt părțile componente principale ale unui motor termic?
5. Cum se definește randamentul motorului termic? Ce valori poate lua el?
- 6.*Cum se definește coeficientul frigorific? Ce valori poate lua el?
7. Pe parcursul unui ciclu, motorul termic a primit de la încălzitor o cantitate de căldură egală cu 1 200 J și din ea a cedat 924 J răcitorului. Determinați randamentul motorului.
8. Un motor termic transmite răcitorului, pe parcursul unui ciclu, o cantitate de căldură egală cu 2 040 J. Ce lucru mecanic a fost efectuat în acest timp, dacă randamentul motorului este egal cu 32%?
- 9.*Un frigider transmite încălzitorului o cantitate de căldură de 4 ori mai mare decât lucrul mecanic consumat pentru funcționarea lui. Determinați coeficientul frigorific al frigiderului.
- 10.*Determinați cantitatea de căldură cedată încălzitorului de agentul frigorific al frigiderului în timpul în care acesta primește de la răcitor o cantitate de căldură egală cu 870 J, dacă coeficientul frigorific $\varepsilon = 3$.

a.* Procese reversibile și ireversibile

Să analizăm mai detaliat una din caracteristicile fundamentale ale proceselor termodinamice.

Considerăm un cilindru cu piston, atît pereții cilindrului, cît și pistonul fiind confecționați din material termoizolant. Admitem că frecarea dintre piston și pereți lipsește complet. Astfel, gazul ideal de sub piston este izolat adiabatic. La rîndul său, pistonul are o tijă cu o policioară orizontală (1) pe care pot fi plasate firișoarele de nisip (2) de pe policioarele fixe (3) cu nisip (fig. 2.26, a). Firișoarele de nisip trec de pe o policioară pe alta aflată la același nivel și această trecere nu necesită efectuarea unui lucru mecanic. Trecem orizontal cîteva firișoare de nisip de pe policioara fixă de sus pe policioara 1. Presiunea exterioară s-a mărit puțin și pistonul s-a deplasat puțin în jos. Continuăm trecerea firișoarelor de nisip pe policioara 1 de pe policioarele fixe care se află la același nivel. Astfel se realizează o comprimare adiabatică foarte lentă a gazului din cilindru (fig. 2.26, b).

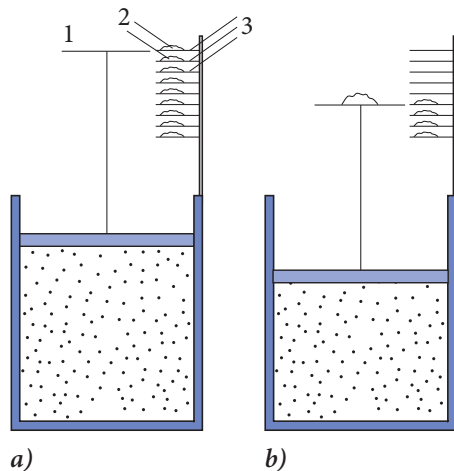


Fig. 2.26

La o comprimare atît de lentă concentrația moleculelor gazului este aceeași în tot volumul, crescînd pe măsura micșorării acestuia. Presiunea și temperatura gazului au unele și aceleași valori, la orice moment de timp, în toate regiunile vasului. Putem afirma deci că la orice moment de timp gazul se află în stare de echilibru termic, de fiecare dată alta. Astfel, pe parcursul procesului de comprimare foarte lentă, gazul de sub piston trece dintr-o stare de echilibru termic în alta.

Să ne imaginăm procesul de dilatare a gazului ce are loc în urma transferului treptat al firișoarelor de nisip de pe policioara 1 pe policioarele fixe prin dreptul cărora ea trece. Dilatarea gazului este foarte lentă și la orice moment de timp el se află în echilibru termic. Gazul, dilatăndu-se lent, trece prin aceleași stări de echilibru termic prin care a trecut la comprimare, însă în succesiune inversă. Cînd gazul revine la starea inițială, firișoarele de nisip se întorc pe policioarele respective, astfel că în mediul exterior nu se produce nicio schimbare.

Asemenea procese care pot fi realizate în sens invers, iar la revenirea sistemului în starea inițială nu se produce nicio schimbare în mediul exterior se numesc procese (transformări) reversibile. Am stabilit că procesele sînt reversibile dacă la orice moment de timp sistemul cercetat se află în stare de echilibru termic. Dacă comprimarea lentă se consideră proces direct, atunci procesul invers este dilatarea lentă.

Să analizăm o altă modalitate de comprimare adiabatică a gazului aflat într-un cilindru similar cu cel din exemplul precedent, dar fără sistemul de policioare. Admitem că la o înălțime mare deasupra pistonului se află un corp masiv și acesta este lăsat să cadă liber (fig. 2.27, a). La ciocnirea plastică a corpului cu pistonul ele se mișcă împreună cu o viteză mare. Volumul gazului se micșorează atât de brusc, încât moleculele lui nu reușesc să se distribuie uniform în tot volumul. Concentrația lor lângă piston devine mai mare decât lângă fundul cilindrului (fig. 2.27, b). Moleculele de lângă piston, fiind lovite de acesta, primesc impulsuri suplimentare, deci au energii cinetice medii mai mari decât cele de la fundul vasului și presiunea produsă de gaz asupra pistonului este mai mare decât asupra fundului. O așa stare a gazului nu este o stare de echilibru termic. Dacă însă pistonul și corpul de pe el se opresc, atunci după un timp gazul trece în stare de echilibru: concentrația moleculelor, presiunea și temperatura devin aceleași în toate regiunile ocupate de gaz.

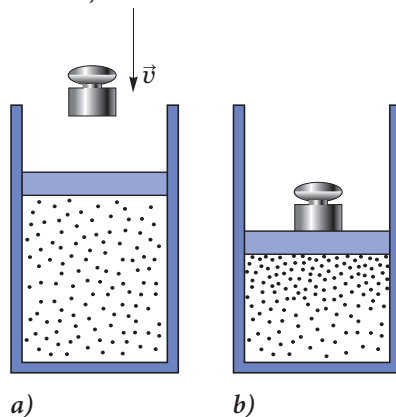


Fig. 2.27

Evident, realizarea procesului invers este imposibilă. La mișcarea bruscă a pistonului în sus moleculele gazului rămân în urmă și concentrația lor lângă piston este mai mică decât la fundul vasului, iar la mișcarea lentă, după cum s-a văzut mai sus, concentrația va fi aceeași în tot vasul. Gazul nicidecum nu poate fi dilatat astfel încât concentrația moleculelor lângă piston să fie mai mare decât la fund, ceea ce a avut loc la comprimarea bruscă. Prin urmare, procesele de comprimare bruscă și de dilatare bruscă sînt **procese ireversibile**. După cum am văzut, pe parcursul procesului ireversibil gazul trece și prin stări de neechilibru.

Astfel, **procesele termodinamice se împart în reversibile și în ireversibile**.

Să analizăm un alt exemplu. Fie un vas separat în două părți de un perete avînd un orificiu închis. De o parte a peretelui se află gazul, de cealaltă – vidul (fig. 2.28, a). Ce se va întîmpla la deschiderea orificiului? Gazul ocupă numai o parte din volumul pus la dispoziție, starea sa nu este de echilibru termic. Treptat gazul trece și în cealaltă parte a vasului (fig. 2.28, b), după un timp concentrația moleculelor lui și ceilalți parametri care-l caracterizează vor lua aceleași valori în toate regiunile vasului. Gazul a trecut în stare de echilibru termic.

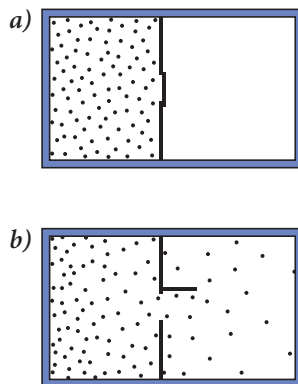


Fig. 2.28

Procesul de trecere a avut loc spontan. Sistemul a trecut prin stări de neechilibru, procesul de trecere este un proces ireversibil. Procesul invers, cînd gazul spontan se adună în partea din stînga a vasului (fig. 2.28), nu se realizează în natură. Pentru a aduce gazul la starea inițială, este necesară efectuarea din exterior a unui lucru la comprimare.

Evident, schimbul de căldură dintre două corpuri cu temperaturi diferite este un proces ireversibil. Sistemul

constituit din aceste două corpuri nu se află în echilibru termic – temperatura nu este una și aceeași în toate regiunile sistemului. Între corpuri are loc schimbul de căldură – aceasta trece de la corpul mai cald la cel mai rece. Temperatura corpului cald se micșorează, a celui rece – se mărește. Schimbul de căldură continuă pînă la egalarea temperaturilor, cînd sistemul trece în stare de echilibru termic.

Procesul invers – trecerea căldurii de la corpul rece la cel cald – nu se realizează spontan. Transferul căldurii de la corpul rece la cel cald poate fi realizat consumînd un lucru mecanic din exterior (cazul frigiderului).

Rezumînd cele expuse mai sus, conchidem că procesele reversibile se realizează numai în condiții ideale (lipsa completă a frecării, variația foarte lentă a volumului). De aceea putem afirma că procesele reversibile sînt niște modele ideale care permit analizarea mai simplă a proceselor reale ce au loc în natură. Acestea sînt însă procese ireversibile, adică se realizează spontan doar într-un sens unic.

b.*Principiul al doilea al termodinamicii

Amintim că principiul întîii al termodinamicii reprezintă legea conservării și transformării energiei, aplicată la fenomenele termice. În conformitate cu acest principiu, în natură au loc numai astfel de procese, în care suma diferitor forme de energie cedate de unele corpuri este neapărat egală cu suma energiilor primite de alte corpuri. Principiul întîii interzice funcționarea motorului termic care ar efectua lucrul mecanic fără a consuma căldură, numit și *perpetuum mobile* (motor veșnic) **de speța întîii**.

Să ne imaginăm însă procese în care principiul întîii se respectă, dar care nu se observă în natură.

De exemplu, un corp este încălzit pînă la o temperatură înaltă, deci posedă o energie internă considerabilă. La un moment, corpul, spontan, de la sine, începe să se ridice în sus, răcindu-se tot mai mult pe măsura creșterii înălțimii sale deasupra Pămîntului. Creșterea energiei potențiale (mecanice) este însoțită de micșorarea respectivă a energiei interne a corpului.

Un alt exemplu. Într-un calorimetru cu apă se introduce un corp încălzit. Ne imaginăm că apa începe să se răcească și îngheață, iar corpul se încălzește și mai mult pe seama căldurii primite de la apă.

În aceste exemple și în multe altele de acest gen, pe care puteți să vi le imaginați, principiul întîii al termodinamicii este satisfăcut, legea conservării energiei are loc, dar așa fenomene nu se întîlnesc în natură, ceea ce demonstrează o dată în plus că procesele spontane se produc într-un sens anumit. Tocmai principiul al doilea al termodinamicii este principiul care indică acest sens, mai bine spus, interzice sensul contrar, reflectă caracterul ireversibil al proceselor în natură.

Se cunosc mai multe formulări ale principiului al doilea. Una din ele a fost propusă în 1850 de fizicianul german Rudolf Clausius (1822–1888):

este imposibilă trecerea spontană a căldurii de la corpurile cu temperaturi mai joase la corpurile cu temperaturi mai înalte.

Această formulare trebuie înțeleasă nu numai în sensul direct, îngust al ei, ci în sens mai general:

este imposibilă construirea unei mașini termice periodice, rezultatul unic al funcționării căreia ar fi transportul de căldură de la un corp rece la un corp mai cald.

Schema unei mașini periodice de acest fel este reprezentată în *figura 2.29*. După fiecare perioadă, agentul de lucru se reîntoarce la una și aceeași stare inițială, astfel în el nu se produce nicio schimbare, iar răcitorul cedează o cantitate de căldură Q pe care o primește încălzitorul aflat la o temperatură mai înaltă.

Menționăm că interdicția impusă de formularea lui Clausius este o interdicție principială și nu depinde de nivelul dezvoltării tehnicii. Mașina „interzisă” nu va putea fi construită niciodată.

Există, bineînțeles, mașini termice periodice, care transportă căldura de la corpurile reci la cele calde, de exemplu, frigiderule. Dar funcționarea lor este însoțită de consumarea unui lucru mecanic din exterior, adică de anumite schimbări în exteriorul lor, cum ar fi arderea combustibilului la centrala termoelectrică sau trecerea unei mase de apă de la un nivel mai înalt la un nivel mai jos la hidrocentrală. Formularea lui Clausius denotă imposibilitatea funcționării frigiderului fără curent electric sau altă sursă de energie.

O altă formulare a fost propusă în 1851 de fizicianul englez William Thomson (1824–1907):

sînt imposibile procesele al căror rezultat unic ar fi luarea unei cantități oarecare de căldură și transformarea ei completă în lucru mecanic.

La prima vedere se pare că această formulare este contrazisă de faptul stabilit mai sus (par. 2.4) că în transformarea izotermă toată cantitatea de căldură primită se transformă în lucru mecanic. De menționat că, în urma dilatării, volumul gazului s-a mărit, adică transformarea totală a căldurii în lucru mecanic nu este un rezultat unic.

Fizicianul german Max Planck (1858–1947) a propus o altă formulare a principiului al doilea al termodinamicii, care prezintă, în fond, aplicarea formulării lui Thomson la motoare termice. După Planck:

este imposibil procesul periodic al cărui rezultat unic ar fi transformarea totală în lucru mecanic a cantității de căldură primită de la o sursă de căldură.

Această formulare, cunoscută mai frecvent ca formularea Thomson–Planck, interzice funcționarea motorului termic cu o sursă unică de căldură (*fig. 2.30*). Cunoașteți deja că motorul termic (*fig. 2.23*) transformă în lucru mecanic numai o parte din cantitatea de căldură Q_1 primită de agentul de lucru de la încălzitor, o altă parte Q_2 este neapărat transmisă răcitorului. Deci formularea Thomson–Planck atestă imposibilitatea funcționării motorului termic la care $Q_2 = 0$, adică al cărui randament ar fi $\eta = 1$.

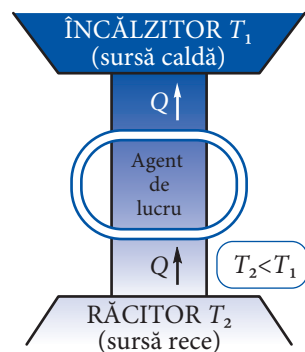


Fig. 2.29

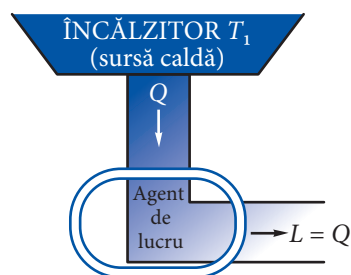


Fig. 2.30

Motorul termic, a cărui schemă este reprezentată în *figura 2.30* (cu $Q_2 = 0$ și $\eta = 1$), ar putea utiliza resurse enorme de energie internă existentă în natură, de exemplu, energia internă a apei oceanelor. S-a calculat că energia cedată de ea la răcirea doar cu $0,1^\circ\text{C}$ este suficientă pentru a satisface necesitățile populației Pământului pentru o perioadă de 2 000 de ani. Un astfel de motor termic este numit **perpetuum mobile de speța a doua**. Funcționarea lui este imposibilă, iar rezervele enorme de energie menționate mai sus sînt inutilizabile. Pentru a utiliza apa oceanelor ca încălzitor al unui motor termic real (schema căruia este reprezentată în *fig. 2.23*), este necesară folosirea obligatorie a unor corpuri cu temperaturi mai joase în calitate de răcitor.

Menționăm că metodele termodinamicii permit demonstrarea echivalenței formulărilor de mai sus ale principiului al doilea. Mai există și alte formulări ale acestui principiu, care folosesc un limbaj matematic mai complicat.

c. Ciclu Carnot. Valoarea maximă a randamentului

Analiza funcționării diferitor tipuri de motoare termice a fost însoțită de indicarea valorilor randamentelor. Acestea variază într-un interval larg – de la $7\div 15\%$ pentru motoarele cu abur pînă la $30\div 39\%$ pentru motoarele Diesel. Randamentul motorului termic nu poate fi egal cu unitatea (cu 100%), fiind neapărat mai mic: $\eta < 1$. Este important să cunoaștem care sînt valorile maxime pe care le pot lua randamentele motoarelor reale, cît de aproape se află ele de 100% .

Această problemă, de o importanță practică incontestabilă, a fost cercetată pentru prima dată de fizicianul francez Nicolas Léonard Sadi Carnot, care a propus un ciclu (diagramă de funcționare) al unui motor ideal, cunoscut sub denumirea de **ciclu Carnot**. Acesta este constituit din două transformări izoterme și două transformări adiabatice.

Gazul ideal aflat în starea inițială 1 se dilată izoterm pînă la starea 2, temperatura lui rămînînd egală cu temperatura inițială T_1 (*fig. 2.31*). În această transformare gazul primește de la încălzitor o cantitate de căldură Q_1 și efectuează un lucru mecanic pozitiv. Urmează dilatarea adiabatică în care gazul nu face schimb de căldură cu mediul exterior, iar temperatura lui se micșorează pînă la o valoare T_2 (porțiunea 2–3 din *fig. 2.31*). La temperatura T_2 gazul este comprimat izoterm (porțiunea 3–4) pînă la o valoare a volumului, astfel încît în urma comprimării adiabatice ulterioare să revină în starea inițială 1. Pe parcursul comprimării izoterme, gazul ideal cedează o cantitate de căldură Q_2 și efectuează un lucru mecanic negativ.

În conformitate cu definiția randamentului (2.50),

$$\eta = \frac{(Q_1 - Q_2)}{Q_1}.$$

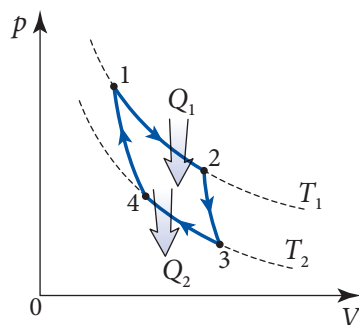


Fig. 2.31



Este unul din creatorii termodinamicii. În lucrarea „Cugetări despre forța motoare a focului și despre mașinile capabile să dezvolte această forță”, publicată în 1824 pe cont propriu, a abordat problema majorării randamentului motoarelor termice, punînd bazele teoriei acestora.

Pornind de la imposibilitatea funcționării motorului veșnic, a arătat că lucrul mecanic util poate fi efectuat numai dacă o parte din căldura primită de la corpul mai cald este transmisă unui corp mai rece. Astfel, Carnot a aplicat, în fond, principiul al doilea al termodinamicii cu circa 25 de ani înainte ca acesta să fie formulat de Clausius și Thomson.

Efectuîndu-se calculele respective pentru randamentul ciclului Carnot (reversibil) cu gaz ideal, se obține expresia:

$$\eta_{\text{rev.}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (2.42)$$

Carnot a demonstrat că această expresie, care a fost dedusă pentru ciclul reversibil avînd în calitate de agent termic gazul ideal, rămîne valabilă și în cazul agentului termic de orice natură. Este important ca ciclul să fie reversibil. Astfel,

randamentul mașinii Carnot depinde numai de temperaturile corpurilor cu care agentul termic face schimb de căldură.

Randamentul mașinii ireversibile este însă mai mic decît valoarea (2.42):

$$\eta_{\text{irev.}} < \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (2.43)$$

S-a demonstrat, de asemenea, că formula (2.42) exprimă valoarea maximă a randamentului motorului termic care ar funcționa cu surse de căldură avînd temperaturile T_1 și T_2 , adică

$$\eta_{\text{max.}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (2.44)$$

Cu alte cuvinte, pentru temperaturile date orice alt ciclu are un randament mai mic decît ciclul Carnot.

Formula (2.44) exprimă valoarea către care pot tinde randamentele motoarelor reale. Să analizăm niște cazuri concrete.

Temperaturile încălzitorului și răcitorului motorului cu abur sînt aproximativ egale cu $T_1 = 480 \text{ K}$ și $T_2 = 300 \text{ K}$. Randamentul maxim pentru acest motor $\eta_{\text{max.}} \approx 37\%$, în timp ce randamentele motoarelor cu abur reale iau valori în intervalul 7–15%.

În cazul motoarelor Otto și Diesel $T_1 \approx 2\,100 \text{ K}$ și $T_2 \approx 380 \text{ K}$, deci randamentul maxim $\eta_{\text{max.}} = 82\%$. Randamentele motoarelor reale sînt între 18 și 24% pentru motoarele Otto și în limita a 30–39% pentru motoarele Diesel.

Prin urmare, randamentele motoarelor termice reale sînt pînă în prezent relativ mici față de valorile lor maxim posibile. Există multiple posibilități de perfecționare a motoarelor termice, de reducere a pierderilor de energie, în special pentru învingerea frecărilor, de îmbunătățire a caracteristicilor lor.

Problemă rezolvată

Se dă:

$$t_1 = 127^\circ\text{C},$$

$$t_2 = 27^\circ\text{C},$$

$$L = 15 \text{ kJ}$$

$$Q_1 - ?, Q_2 - ?$$

SI:

$$400 \text{ K},$$

$$300 \text{ K},$$

$$15 \cdot 10^3 \text{ J}$$

J

O mașină termică Carnot efectuează un lucru mecanic de 15 kJ. Determinați cantitatea de căldură cedată sursei reci și cea primită de la sursa caldă, dacă temperaturile lor sînt egale cu 27°C și, respectiv, cu 127°C .

Rezolvare

Pentru randamentul mașinii termice Carnot este valabilă atât relația (2.42), cît și (2.41):

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

de unde

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Lucrul mecanic efectuat de mașina termică reprezintă diferența dintre cantitățile de căldură comunicată sursei calde Q_1 și cedată sursei reci Q_2 :

$$L = Q_1 - Q_2,$$

de unde

$$Q_1 = L + Q_2.$$

Așadar, introducînd ultima relație în expresia pentru raportul temperaturilor, obținută din formula pentru randament, obținem:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{L + Q_2},$$

de unde

$$Q_2 = \frac{T_2}{T_1 - T_2} L; \quad Q_2 = 45 \text{ kJ}.$$

Pentru cantitatea de căldură primită de la sursa caldă avem:

$$Q_1 = L + Q_2 = \frac{T_1}{T_1 - T_2} L; \quad Q_1 = 60 \text{ kJ}.$$

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

- 1.*O porțiune mică a unei transformări ciclice este ireversibilă, celelalte fiind reversibile. Ce putem afirma despre această transformare ciclică: este reversibilă sau ireversibilă?
- 2.*În ce ar consta funcționarea unui *perpetuum mobile* de speța întâi?
- 3.*Care mașină termică este „interzisă” de principiul al doilea al termodinamicii în formula-re lui Clausius?
- 4.*În ce constă deosebirea dintre formulările lui Thomson și Thomson–Planck?
- 5.*Care din principiile termodinamicii interzice și care nu interzice funcționarea unui *perpetuum mobile* de speța a doua? Argumentați răspunsul.
6. Din ce procese este constituit ciclul Carnot? În care din ele agentul termic primește și în care cedează căldură?
7. Ce factori determină randamentul unui ciclu Carnot reversibil? Depinde oare acesta de natura agentului de lucru?

8. Un motor efectuează un ciclu Carnot. Determinați randamentul lui, dacă temperatura sursei calde este egală cu 427°C , iar temperatura sursei reci – cu 7°C .
9. Temperatura sursei reci a unui ciclu Carnot este egală cu 9°C . Care este temperatura sursei calde, dacă randamentul motorului este egal cu 40%?
10. Pe parcursul unui ciclu reversibil, agentul de lucru primește de la sursa caldă o cantitate de căldură egală cu 300 kJ. Temperatura sursei calde este egală cu 450 K, iar a celei reci cu 285 K. Determinați cantitatea de căldură transmisă sursei reci.
11. Un motor reversibil efectuează un lucru mecanic egal cu 214 J și transmite în acest timp sursei reci o cantitate de căldură egală cu 321 J. Care este temperatura sursei calde, dacă temperatura sursei reci este egală cu 21°C ?

2.7 MAȘINILE TERMICE ȘI PROTECȚIA MEDIULUI

Sînt bine cunoscute rolul și importanța mașinilor termice de cele mai diverse construcții și destinații. Funcționarea lor însă are și o influență nefastă asupra mediului ambiant.

Motoarele termice consumă în timpul funcționării diferiți combustibili: cărbune, păcură, motorină, kerosen (gaz lampant), benzină, gaze naturale etc. În urma arderii acestor combustibili se micșorează cantitatea de oxigen și crește cantitatea de dioxid de carbon (CO_2) în natură. În plus, combustibilii conțin și anumite impurități, de exemplu sulf (circa 2% – cărbunele, circa 2,5% – petrolul, aproximativ 0,05% – gazele naturale). În consecință, consumarea acestor combustibili este însoțită de eliminarea în atmosferă a compușilor sulfului (SO_2 , H_2S). Arderea cărbunelui este însoțită, de asemenea, de degajarea în atmosferă a unor cantități enorme de praf. Pentru a evita detonarea benzinei în motoarele automobilelor, se adaugă compuși ai plumbului (benzina cu plumb), astfel că în urma funcționării lor în atmosferă se degajă și compuși ai plumbului. Motoarele termice mai elimină în atmosferă și oxizi de azot.

Pe măsura dezvoltării tehnicii și a utilizării largi a motoarelor termice, cantitățile de praf și de gaze degajate de ele în atmosferă au devenit tot mai mari. Astfel, potrivit statisticilor, pe parcursul unui an pe Pămînt sînt aruncate în atmosferă circa 20 miliarde de tone de dioxid de carbon, 200 milioane de tone de oxid de carbon, 150 milioane de tone de compuși ai sulfului, 50 milioane de tone de oxizi ai azotului, 250 milioane de tone de praf. Pe teritoriul Republicii Moldova, în atmosferă sînt degajate anual circa 9 milioane de tone de dioxid de carbon, 160 mii de tone de oxid de carbon, 500 de tone de oxizi ai azotului etc.

Care sînt urmările acestei laturi a funcționării motoarelor termice?

În primul rînd, gazele evacuate în urma arderii combustibililor au temperaturi mai ridicate decît temperatura atmosferei și duc la încălzirea directă a acesteia.

În al doilea rînd, ele reduc transparența atmosferei. Este cunoscut că sursa principală de energie pentru Pămînt este Soarele. Pămîntul emite la rîndul său energie. Se stabilește un bilanț anumit între energia primită de Pămînt de la Soare și energia radiată de Pămînt în cosmos. Gazele degajate în atmosferă de mașinile termice absorb o parte din energia care părăsește Pămîntul, ceea ce condiționează creșterea temperaturii lui.

Acest fenomen este cunoscut sub denumirea de **efect de seră**. Creșterea temperaturii Pământului conduce la schimbarea climei, la topirea ghețarilor, la ridicarea nivelului apelor, la mărirea cantității de vapori de apă în atmosferă, efectul de seră devenind mai pronunțat etc.

În al treilea rând, unele gaze (SO_2 , H_2S ș.a.) intră în reacție cu vaporii de apă și formează picături mici de soluții ale acizilor. Acestea cad apoi sub formă de ploi acide, care au o acțiune nocivă asupra vieții vegetale și animale, măresc aciditatea solului, accelerează coroziunea metalelor, deteriorează construcțiile din marmură și din calcar etc.

Pentru a diminua efectele adverse ale funcționării motoarelor termice, se întreprind diferite măsuri. De exemplu, se asigură arderea cât mai completă a combustibililor: la centralele termoelectrice care funcționează cu cărbune acesta este preventiv fărâmițat, motoarele automobilelor se reglează astfel încât arderea să fie cât mai completă, conținutul de oxid de carbon din gazele de eșapament să fie minim etc.

Totodată, gazele obținute în urma arderii sînt curățate înainte de degajarea lor în atmosferă. Astfel, pentru a micșora pătrunderea compușilor sulfurului în atmosferă, la praful de cărbune sau la păcura folosite la centralele termoelectrice se adaugă calcar, care intră în reacție cu compușii sulfurului. Coșurile acestor centrale sînt dotate cu filtre electrostatice speciale, care rețin particulele solide (praful) din fum.

Continuă munca de perfecționare a motoarelor existente, în special de creștere a randamentului lor. Se trece de la motoarele cu carburator la motoarele Diesel, care au un randament mai mare, ceea ce contribuie la economisirea combustibililor, pe de o parte, și la excluderea compușilor plumbului în benzină, pe de altă parte.

Se fac cercetări în sensul ameliorării calității combustibililor, se caută combustibili ecologic puri. Gazele naturale sînt filtrate pentru a se reține impuritățile din ele. Se experimentează automobile cu combustibili noi: cu hidrogen (în acest caz, în urma arderii se obține apă), cu alcool (obținut din trestie-de-zahăr în țările Americii Latine). Au fost construite primele electromobile care folosesc acumulatori ca sursă de energie electrică.

Este bine cunoscut rolul pădurilor (în Republica Moldova acestea ocupă doar 9,6% din întreg teritoriul) în reducerea conținutului dioxidului de carbon. De aceea pădurile, fișiile forestiere, parcurile etc. trebuie protejate, îngrijite, în locul copacilor uscați trebuie plantați puieți.

O altă clasă de mașini termice sînt **mașinile frigorifice** – frigidere, congelatoare, climatizoare etc. –, care permit obținerea unor temperaturi mai joase decît cea a mediului ambiant. Ele au o utilizare largă în industria alimentară, în transport, în comerț – la păstrarea alimentelor, îndeosebi a celor ușor alterabile, în medicină – la păstrarea medicamentelor și a diverselor preparate etc.

Mașinile frigorifice utilizează în calitate de agenți de lucru o clasă de substanțe cu denumirea comună de freoni – clorfluorcarburi și hidroclorfluorcarburi. Pătrunzînd în atmosferă, la înălțimi mari, aceste substanțe distrug stratul de ozon (O_3).

Aerul care conține o cantitate excesivă de ozon devine toxic pentru om. În același timp, ozonul din stratul situat la înălțimi cuprinse între 11 și 48 km deasupra Pământului are o importanță deosebită pentru viață, întrucît asigură protecția contra radiației ultraviolete nocive a Soarelui. La intensități mai mari, această radiație

cauzează creșterea considerabilă a numărului de îmbolnăviri de cancer al pielii, de boli de ochi, îndeosebi de cataractă, afectează sistemul imun al omului, periclitează lumea vegetală etc.

Clorul din freoni joacă rolul de catalizator, transformînd ozonul (O_3) în oxigen obișnuit (O_2). Această acțiune catalizatoare este de lungă durată, echivalentă cu perioada de existență a freonilor. Pentru freonul-12 această perioadă este de 112 ani, pentru freonul-113 – de 85 de ani, iar pentru freonul-11 – de 50 de ani. Se impune limitarea și chiar excluderea completă a utilizării freonilor, în primul rînd a celor cu o perioadă lungă de existență. Chiar și după aceasta, freonii vor mai distruge timp îndelungat stratul de ozon.

Protecția mediului constituie o problemă globală. A fost adoptată Convenția-cadru a Organizației Națiunilor Unite privind schimbarea climei, semnată de Republica Moldova la 9 iunie 1995. Această convenție prevede realizarea unor programe concrete de protecție a mediului de părțile semnatare.

În 1985, la Viena a fost adoptată Convenția pentru protecția stratului de ozon. În cadrul ei, în 1987 a fost semnat Protocolul de la Montréal privind substanțele care distrug stratul de ozon. A fost elaborat un program care prevede micșorarea treptată a producerii și utilizării unor freoni, în special a celor cu existență de lungă durată, pînă la interzicerea completă a lor. Acest program a fost apoi precizat la conferințele părților semnatare de la Londra (1990) și Copenhaga (1992). În 1996, Republica Moldova a devenit parte a Convenției de la Viena și a Protocolului de la Montréal. Pentru a sensibiliza populația asupra importanței acestei probleme, ziua de 16 septembrie a fost declarată Ziua Internațională a Protecției Stratului de Ozon.

Un document de importanță deosebită pentru ocrotirea mediului – Protocolul de la Kyoto –, negociat de 160 de țări în 1997, a intrat în vigoare în octombrie 2004 după ratificarea lui de un număr suficient de state, printre ele și Republica Moldova. Protocolul prevede reducerea în perioada 2008–2012 a emisiilor gazelor de seră cu 5,2% în comparație cu cele din 1990.

Trebuie să fim conștienți de faptul că problemele ocrotirii mediului ne vizează în egală măsură pe fiecare. Evitînd pierderile de căldură în încăperile bine pregătite pentru iarnă și economisind energia electrică (prin deconectarea luminii în încăperile în care nimeni nu se află sau în timpul cînd este destulă lumină solară), reducem consumul de combustibil cu toate consecințele corespunzătoare. Protejînd spațiile verzi, sîdind pomi, lăsăm generațiilor următoare un mediu care ar permite continuarea și prosperarea vieții pe Pămînt.

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. În ce constă efectul de seră?
2. Ce schimbări ale mediului sînt consecințe ale efectului de seră?
3. Cum se formează ploile acide și ce acțiuni nocive produc ele?
4. În ce constă rolul protector al stratului de ozon pentru viața pe Pămînt?
5. Ce măsuri se iau pentru protejarea mediului? Dați exemple.

TEST DE EVALUARE SUMATIVĂ

PROFIL REAL

1	Completați spațiile punctate astfel încât următoarele afirmații să fie adevărate:
	a) Procesul la care starea finală a sistemului ... se numește proces ciclic. 1 p.
	b) Cantitatea de căldură primită de sistemul termodinamic este egală cu suma ... și a lucrului mecanic efectuat de sistem. 1 p.
	c) Randamentul mașinii termice este egal cu raportul dintre ... și cantitatea de căldură primită de la încălzitor. 1 p.
2	Determinați valoarea de adevăr a următoarelor afirmații, marcând „A” dacă afirmația este adevărată și „F” dacă afirmația este falsă.
	a) Energia internă a unui sistem termodinamic dat depinde doar de starea în care se află sistemul și nu depinde de stările precedente în care el s-a aflat. <input type="checkbox"/> 1 p.
	b) Lucrul efectuat de gazul ideal într-un proces ciclic este nul. <input type="checkbox"/> 1 p.
	c) Lucrul gazului ideal într-o transformare adiabatică este egal cu variația energiei interne a lui, luată cu semnul minus. <input type="checkbox"/> 1 p.
Itemii 3 și 4 sînt alcătuiți din cîte două afirmații legate între ele prin conjuncția deoarece . Stabiliți dacă afirmațiile sînt adevărate (scriind A) sau false (scriind F) și dacă între ele există relația cauză–efect (scriind da sau nu).	
3	Energia internă a gazului ideal monoatomic aflat la volum constant nu se modifică la variația presiunii lui, deoarece această energie este determinată doar de numărul de moli ai gazului și de temperatura lui.
Răspuns:	
afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .	
4	La dilatarea adiabatică a gazului ideal vitezele moleculelor lui se micșorează, deoarece în acest proces gazul efectuează lucrul mecanic negativ.
Răspuns:	
afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .	

5	La trecerea unui sistem termodinamic din starea 1 în starea 2, energia sa internă variază cu $\Delta U_{12} = 180 \text{ J}$, iar la trecerea din starea 2 în starea 3 – cu $\Delta U_{23} = -40 \text{ J}$. Care este variația energiei interne a acestui sistem la trecerea lui din starea 3 în starea 1?	2 p.
6	Primind o cantitate de căldură egală cu 910 J, gazul a efectuat un lucru mecanic de 260 J. Să se determine variația energiei interne a gazului în acest proces.	2 p.
7	Un gaz ideal monoatomic a trecut din starea inițială caracterizată de parametri $p_1 = 1,8 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, $V_1 = 4,5 \text{ L}$ în starea finală cu parametri $p_2 = 1,4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, $V_2 = 6,5 \text{ L}$. Pe diagrama (p , V) procesul de trecere dintre aceste stări se reprezintă printr-un segment de dreaptă ce le unește. Calculați pentru acest proces:	
	a) lucrul mecanic efectuat de gaz;	3 p.
	b) variația energiei interne a gazului;	3 p.
	c) cantitatea de căldură primită.	2 p.
8	Temperatura sursei calde a unei mașini termice este egală cu 127°C , iar cea a sursei reci – cu 31°C . Pe parcursul unui ciclu, agentul termic al mașinii transmite sursei reci o cantitate de căldură de 1,14 kJ. Determinați:	
	a) randamentul mașinii termice;	3 p.
	b) cantitatea de căldură primită de agentul termic de la sursa caldă;	3 p.
	c) lucrul mecanic efectuat de mașină într-un ciclu.	2 p.

PROFIL UMANIST

1	Completați spațiile punctate astfel încât următoarele afirmații să fie adevărate:	
	a) Energia internă a gazului ideal depinde doar ... lui.	1 p.
	b) Capacitatea calorică a unui corp este egală cu ... dintre cantitatea de căldură transmisă corpului și variația temperaturii lui.	1 p.
	c) Cantitatea de căldură primită de un sistem este egală cu suma dintre ... și lucrul mecanic efectuat de acesta asupra corpurilor exterioare.	1 p.
2	Determinați valoarea de adevăr a următoarelor afirmații, marcând „A” dacă afirmația este adevărată și „F” dacă afirmația este falsă.	
	a) Lucrul gazului efectuat la variația volumului său este o mărime de stare. <input type="checkbox"/>	1 p.
	b) În transformarea izotermă cantitatea de căldură transmisă sistemului este egală cu variația energiei sale interne. <input type="checkbox"/>	1 p.
	c) Randamentul motoarelor termice este o mărime ce caracterizează eficacitatea acestora. <input type="checkbox"/>	1 p.
	Itemii 3 și 4 sînt alcătuiți din cîte două afirmații legate între ele prin conjuncția deoarece . Stabiliți dacă afirmațiile sînt adevărate (scriind A) sau false (scriind F) și dacă între ele există relația cauză–efect (scriind da sau nu).	
3	Într-o transformare izotermă sistemul termodinamic nu primește căldură, deoarece în transformarea ce se produce la temperatură constantă variația energiei interne este egală cu zero.	
	Răspuns:	3 p.
	afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .	
4	Căldura molară la presiune constantă este mai mare decît căldură molară la volum constant, deoarece în procesul izobar o parte din căldura primită se consumă pentru efectuarea lucrului mecanic.	
	Răspuns:	3 p.
	afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .	
5	Determinați energia internă a 2 moli de gaz ideal monoatomic aflat la temperatura de 27°C.	
		2 p.
6	Unui gaz i s-a comunicat o cantitate de căldură egală cu 1,5 kJ. Ce lucru mecanic a efectuat gazul, dacă variația energiei lui interne a fost egală cu 900 J?	
		2 p.

7	<p>Sub pistonul unui cilindru vertical se află $m = 2$ kg de heliu. Gazului i s-a comunicat o cantitate de căldură de 105 kJ și temperatura lui s-a mărit cu 10 K. Determinați:</p>
a) căldurile molare la presiune constantă C_p și la volum constant C_v ale heliului;	3 p.
b) variația energiei interne a gazului;	3 p.
c) lucrul mecanic efectuat de gaz la dilatare.	2 p.
8	<p>O cantitate $\nu = 1$ mol de gaz ideal monoatomic ocupă volumul $V_1 = 10$ L la presiunea $p_1 = 100$ kPa. La încălzire gazul s-a dilatat la presiune constantă până la volumul $V_2 = 30$ L, după care presiunea lui a crescut de 2 ori la volum constant. Determinați:</p>
a) temperatura gazului în starea inițială, la sfârșitul transformării izobare și la sfârșitul celei izocore;	3 p.
b) lucrul mecanic efectuat de gaz;	3 p.
c) variația energiei interne a gazului;	3 p.
d) cantitatea de căldură comunicată gazului.	2 p.

LICHIDE ȘI SOLIDE. TRANSFORMĂRI DE FAZĂ

3.1*

STRUCTURA ȘI PROPRIETĂȚILE GENERALE ALE LICHIDELOR

După cum rezultă din par. 1.3, stările solidă și gazoasă reprezintă două cazuri extreme de distribuție spațială a particulelor. Dacă starea gazoasă se caracterizează printr-o dezordine totală în distribuirea particulelor în spațiu, atunci celei solide îi este proprie o ordine perfectă la așezarea lor într-o rețea spațială. Substanța lichidă reprezintă o stare intermediară între cele cristalină și gazoasă.

Observațiile cotidiene ne conduc la concluzia că

lichidele se caracterizează prin volum propriu, dar nu au formă proprie, prezentînd proprietatea de curgere.

Din punctul de vedere al teoriei cinetico-moleculare, existența volumului propriu demonstrează că între moleculele lichidului acționează forțe de atracție. Ele sînt mult mai mari decît cele între moleculele gazului, dar mai mici decît forțele de atracție între moleculele solidului.

Energia medie a mișcării termice a moleculelor lichidului este aproximativ egală cu valoarea absolută a energiei potențiale medii de interacțiune a lor (par. 1.3 și *fig. 1.3*). Din această cauză, mișcarea termică poate rupe cu ușurință legăturile dintre molecule. În consecință, ultimele capătă o anumită libertate de mișcare în interiorul lichidului, ceea ce explică fluiditatea acestuia și proprietatea de a lua forma vasului în care se află.

Datorită forțelor de atracție dintre molecule, densitatea lichidelor este mult mai mare decît a gazelor. După cum vom vedea în continuare (par. 3.2, *a*), acțiunea acestor forțe conduce la faptul că

lichidele sînt practic incompresibile.

S-a observat că lichidele întotdeauna sînt izotrope și în interiorul lor nu există regiuni anizotrope ca în cazul policristalelor. Aceasta înseamnă că în lichide nu există ordine la distanță. Deoarece moleculele lichidului se află foarte aproape una de alta, ele interacționează simultan cu cîteva molecule vecine, formînd astfel o legătură între pozițiile lor, adică se creează o anumită ordine în amplasarea moleculelor. Însă din

cauza mobilității ultimelor, această ordine se respectă numai la distanțe de aproximativ două sau trei straturi moleculare. Se spune în acest caz că amplasarea spațială a moleculelor lichidului se caracterizează prin **ordine locală**.

Dimensiunile regiunilor în care există ordinea locală (2-3 straturi moleculare) sînt prea mici pentru a se menține stabile. Deoarece energia cinetică medie a moleculelor este suficientă pentru a învinge atracția celor vecine și pentru a le elibera din sfera lor de acțiune, moleculele imediat nimeresc în sfera de acțiune a altora, formînd o nouă stare temporară de echilibru. Astfel, ordinea locală apare și dispare continuu în tot volumul lichidului. Din această cauză proprietățile fizice ale lichidului sînt aceleași în tot volumul său. Cu alte cuvinte,

lichidele întotdeauna sînt izotrope.

Proprietățile lichidelor se modifică odată cu schimbarea condițiilor externe, în special cu temperatura. La temperaturi joase gradul de ordonare al moleculelor lichidului crește și structura lui se aseamănă mai mult cu cea a solidelor. Și invers, la temperaturi înalte ordinea locală se alterează și la valori suficient de mari ale temperaturii lichidul va trece în stare gazoasă.

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Cum vă imaginați structura internă a unui lichid?
2. Caracterizați noțiunea de „ordine locală”.
3. Enumerați proprietățile generale ale lichidelor.
4. Cum se modifică structura internă a lichidelor la temperaturi joase? Dar la temperaturi înalte?

3.2*

FENOMENE SUPERFICIALE

Fluiditatea lichidelor determină existența unei suprafețe libere a lor, care totodată este și o suprafață de separație dintre diferite medii – lichid–solid, lichid–lichid sau lichid–gaz. Anume datorită acestei suprafețe de separație, lichidele se caracterizează prin fenomene calitativ noi, numite **superficiale**. Acestea sînt o consecință directă a acțiunii forțelor de atracție dintre moleculele lichidului din regiunea suprafeței de separație și cele din interiorul lui sau din alte medii.

Forțele de atracție dintre moleculele aceluiași mediu se numesc **forțe de coeziune**, iar dintre moleculele diferitor medii – **forțe de adeziune**.

În cele ce urmează vom analiza acțiunea acestor forțe și rolul lor în fenomenele superficiale.

a. Stratul superficial. Coeficientul tensiunii superficiale

Să cercetăm un lichid oarecare, a cărui suprafață liberă îl separă de un mediu gazos, și să analizăm acțiunea forțelor de atracție dintre molecule. Este cunoscut

că forțele de atracție dintre molecule se manifestă numai la distanțe mici, egale cu raza de acțiune moleculară $r_m \sim 10^{-9}$ m (par. 1.3). Între moleculele ale căror centre se află la o distanță d de la suprafața lichidului mai mare decât raza sferei de acțiune moleculară r_m se exercită forțe de coeziune.

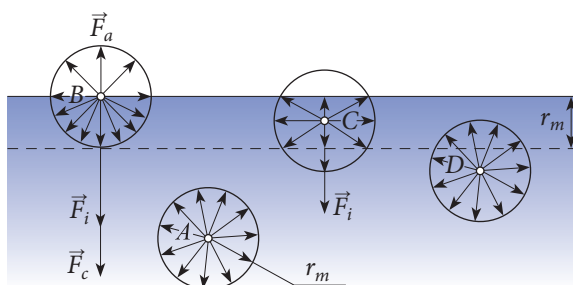


Fig. 3.1

Rezultanta acestora pentru orice astfel de moleculă (de exemplu A sau D, fig. 3.1) întotdeauna este egală cu zero, deoarece molecula este atrasă uniform în toate direcțiile de moleculele ce se află în sfera ei de acțiune.

Să examinăm acum o moleculă a lichidului ce se află pe suprafața de separație (molecula B, fig. 3.1). Asupra ei acționează atât forțe de coeziune, între moleculele lichidului, cât și de adeziune, între moleculele de gaz și cele de lichid. Este evident că rezultanta forțelor de coeziune F_c este mult mai mare decât a celor de adeziune F_a , deoarece în sfera de acțiune a moleculei examinate numărul moleculelor de gaz este mult mai mic decât al celor de lichid. În consecință, asupra ei acționează o forță interioară rezultantă de mod $F_i = F_c - F_a \approx F_c$ perpendiculară pe suprafața lichidului și orientată spre interiorul lui.

Moleculele ce se află sub suprafața liberă a lichidului la distanțe d mai mici decât raza de acțiune moleculară r_m sînt și ele atrase spre interiorul lichidului, dar cu forțe interioare rezultante F_i mai mici. Într-adevăr, pentru molecula C (fig. 3.1) o parte din forțele de coeziune se compensează reciproc și rezultanta lor F_i devine mai mică. Când sfera de acțiune moleculară se află complet în lichid, adică $d \geq r_m$, forța interioară F_i devine egală cu zero.

Așadar, toate moleculele de la suprafața lichidului ce se află într-un strat de grosime egală cu raza de acțiune moleculară sînt atrase spre interiorul lui. Acest strat poartă denumirea de **strat superficial**.

Datorită lui în lichide se creează o presiune numită **internă** sau **moleculară**. Sub acțiunea acestei presiuni, moleculele lichidului se apropie una de alta pînă cînd forțele de respingere echilibrează forțele de comprimare create de stratul superficial.

De menționat că presiunea internă nu acționează asupra corpurilor introduse în lichid. Într-adevăr, între corp și lichid se formează un strat superficial în care forțele interne sînt orientate de la corp spre interiorul lichidului.

Grație forțelor de coeziune mari, stratul superficial creează presiuni foarte intense în interiorul lichidului. De exemplu, stratul superficial al apei creează o presiune internă de aproximativ $1\,079\text{ MPa} \approx 11\,000\text{ atm}$! Acum devine clar de ce lichidele sînt practic incompresibile. Pentru a comprima vizibil un lichid, trebuie să aplicăm asupra lui presiuni mai mari sau cel puțin comparabile cu presiunea internă exercitată de stratul superficial.

Presupunem că sub acțiunea forțelor de coeziune un număr de molecule din stratul superficial se deplasează spre interiorul lichidului. Atunci se va efectua un lucru mecanic $L_s > 0$, iar suprafața liberă a lichidului se va micșora, adică $\Delta S < 0$. Dacă însă

dorim să obținem o creștere a suprafeței libere ($\Delta S > 0$), atunci este nevoie să aducem pe această suprafață molecule din interiorul lichidului, adică să efectuăm un lucru mecanic împotriva forțelor de coeziune ($L_s < 0$). Rezultă că lucrul mecanic efectuat de forțele interne este proporțional cu variația suprafeței libere a lichidului:

$$L_s = -\sigma \Delta S, \quad (3.1)$$

unde coeficientul de proporționalitate σ care depinde de natura lichidului și temperatura lui este numit **coeficient de tensiune superficială**. Semnul „-” în relația (3.1) arată că la efectuarea de forțele interne a unui lucru mecanic pozitiv suprafața liberă a lichidului se micșorează.

Din (3.1) rezultă:

$$\sigma = \frac{L_s}{|\Delta S|}. \quad (3.2)$$

Măsura coeficientului tensiunii superficiale este determinată de lucrul mecanic efectuat pentru variația ariei suprafeței libere a lichidului cu o unitate. În SI

$$[\sigma] = \frac{J}{m^2} = \frac{N \cdot m}{m^2} = \frac{N}{m}.$$

Moleculele din stratul superficial posedă o energie potențială mai mare decât cea a moleculelor din interiorul lichidului. Într-adevăr, din mecanică cunoaștem că orice corp ridicat la o înălțime oarecare posedă energie potențială. Când moleculele trec din interiorul lichidului în stratul superficial, energia ei potențială crește. Surplusul de energie potențială creat reprezintă energia potențială a stratului superficial E_{ps} . Anume pe seama acestei energii se efectuează lucrul mecanic L_s la deplasarea moleculelor în interiorul lichidului. Folosind relația dintre lucrul mecanic și energia potențială, avem:

$$L_s = -\Delta E_{ps}.$$

Utilizând formula (3.1), obținem:

$$\Delta E_{ps} = \sigma \Delta S. \quad (3.3)$$

Este cunoscut că orice sistem întotdeauna tinde să ocupe o stare cu energia potențială minimă. Atunci din (3.3) rezultă că aria suprafeței de separație tinde și ea să fie minimă. Din geometrie însă se știe că pentru un volum dat figura cu aria suprafeței minimă este o sferă. În acest caz, în lipsa forțelor exterioare, lichidele trebuie să posedă formă sferică. Într-adevăr, picăturile mici de apă, pentru care forța gravitațională este neglijabilă din cauza maselor mici, au forma aproape sferică.

Tendința lichidelor de a-și micșora aria suprafeței libere conduce la apariția pe această suprafață a unor forțe orientate de-a lungul ei. Într-adevăr, moleculele de pe suprafața liberă interacționează nu numai cu cele din interiorul lichidului, ci și între ele. Pentru molecula A (fig. 3.2) rezultanta forțelor de atracție din sfera de acțiune moleculară, orientate de-a lungul suprafeței, este egală cu zero. Însă pentru orice moleculă de pe conturul ei (de exemplu, B) această rezultantă \vec{R}_B este diferită de zero. Așadar, forțele interne orientate tangent la suprafața lichidului spre interiorul ei acționează asupra oricărui contur închis

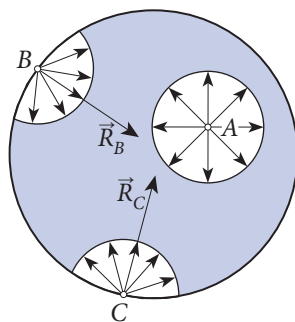


Fig. 3.2

ce o mărginește, fiind perpendiculare pe el (fig. 3.2). Aceste forțe au fost numite **forțe de tensiune superficială**. Existența lor se poate pune în evidență cu ajutorul lichidului glicerol (o soluție de apă, săpun, zahăr și glicerol). De conturul unui inel de sîrmă legăm un fir subțire de ață. Introducem inelul în lichidul glicerol și după scoaterea lui din lichid observăm că firul se află într-o poziție liberă (netensionată) pe membrana de lichid prinsă pe inel (fig. 3.3, a), deoarece forțele superficiale se echilibrează. Dacă membrana se sparge din partea dreaptă a firului, atunci forțele superficiale micșorează aria suprafeței mărginite de conturul nou-format și firul se întinde (fig. 3.3, b).

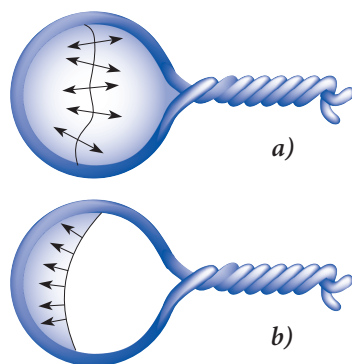


Fig. 3.3

Să demonstrăm că forța de tensiune superficială este proporțională cu lungimea conturului ce mărginește suprafața liberă a lichidului. Pentru aceasta se studiază membrana de lichid glicerol formată pe un cadru dreptunghiular cu o latură mobilă de lungime l (fig. 3.4, a). Deși membrana este foarte subțire, grosimea ei este totuși mult mai mare decât diametrul unei molecule. Din acest motiv ea reprezintă un volum de lichid cu două suprafețe identice de-a lungul cărora acționează forțe superficiale (fig. 3.4, b).

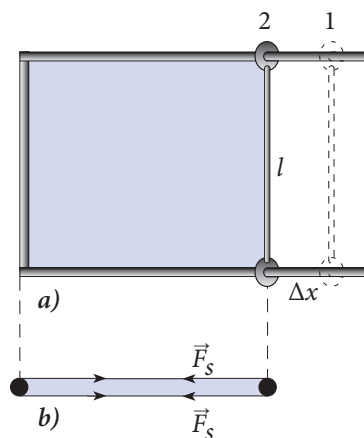


Fig. 3.4

Sub acțiunea forțelor interne, o parte din moleculele straturilor superficiale sînt atrase în interiorul membranei, și ariile celor două suprafețe ale ei, după deplasarea laturii mobile l cu distanța Δx , devin minime. Conform relației (3.1), lucrul mecanic efectuat de aceste forțe este

$$L_s = -\sigma \cdot 2\Delta S.$$

După deplasarea laturii mobile l pe distanța Δx , suprafața liberă a membranei se micșorează și rezultă că $\Delta S = -l\Delta x$. Atunci $L_s = 2\sigma l\Delta x$.

Același lucru mecanic se poate exprima și prin forțele superficiale ce acționează pe distanța Δx :

$$L_s = 2F_s\Delta x.$$

După simplificarea prin $2\Delta x$, din expresiile precedente pentru lucrul L_s se obține:

$$F_s = \sigma l, \quad (3.4)$$

de unde

$$\sigma = \frac{F_s}{l}. \quad (3.5)$$

Coeficientul tensiunii superficiale σ este numeric egal cu forța superficială ce acționează pe o unitate de lungime a conturului suprafeței libere a lichidului.

Așadar, stratul superficial al lichidului se află permanent în stare tensionată. Ar fi însă greșit să facem o asemănare a suprafeței libere cu o peliculă elastică întinsă. Într-adevăr, forțele elastice se măresc odată cu creșterea suprafeței peliculei, pe când cele superficiale nu depind de suprafața lichidului, deoarece numărul de molecule pe o unitate de suprafață este întotdeauna același.

Lucrare de laborator*

STUDIUL FENOMENELOR SUPERFICIALE

Scopul lucrării:	Determinarea coeficientului de tensiune superficială prin metoda desprinderii picăturilor.
Aparate și materiale necesare:	o balanță; o cutie cu mase marcate; un micrometru (șubler); o pîlnie, un robinet și un tub îngust de sticlă (cu diametrul de 3–6 mm), unite între ele cu niște tuburi de cauciuc; un pahar pentru colectarea picăturilor; un stativ cu clește; o pană din lemn moale (brad).

Considerații teoretice

Desprinderea picăturii de lichid de la tubul de sticlă are loc după ce forța ei de greutate G devine egală cu forța de tensiune superficială F_s (3.4), adică $\sigma l = mg$, unde m este masa picăturii, g – accelerația gravitațională, iar l – lungimea conturului suprafeței libere a lichidului la momentul desprinderii ei. Deoarece $l \approx \pi D$, unde D este diametrul interior al tubului, pentru coeficientul tensiunii superficiale obținem: $\sigma = \frac{mg}{\pi D}$.

Întrucît masa unei singure picături este foarte greu de măsurat, se determină masa M a n picături. Atunci $m = M/n$ și pentru coeficientul de tensiune superficială avem: $\sigma = \frac{Mg}{n\pi D}$.

Modul de lucru:

1. Măsurăți diametrul interior al tubului de sticlă de la care se vor desprinde picăturile de lichid. Pentru aceasta introduceți pana de lemn în tub și observați pînă la ce adîncime intră ea, măsurînd apoi cu micrometrul (șublerul) diametrul penei în acel loc.
2. Realizați montajul experimental ca în figura 3.5.
3. Închideți robinetul și turnați lichidul în pîlnie.
4. Deschideți robinetul astfel încît într-un minut să picure 30–50 de picături.

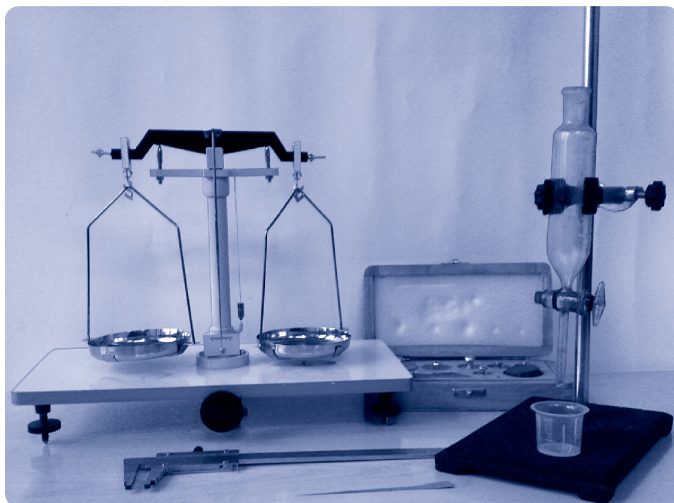


Fig. 3.5

În acest caz se consideră că picăturile se desprind numai sub acțiunea forței de greutate.

5. Cîntăriți cu balanța (cît mai precis) paharul pentru colectarea picăturilor (m_1).
6. Așezați paharul sub tubul de sticlă și lăsați să picure în el 60 de picături.
7. Cîntăriți paharul cu lichidul colectat (m_2) și determinați masa lichidului $M = m_2 - m_1$.
8. Repetați experiențele de două ori, colectînd 90 și, respectiv, 120 de picături.
9. Completați tabelul de mai jos.

Nr. crt.	D (mm)	m_1 (g)	m_2 (g)	M (g)	n	σ (N/m)	σ (N/m)
1.					60		
2.					90		
3.					120		

- 10. Calculați erorile absolută și relativă, comise de măsurarea coeficientului de tensiune superficială cu ajutorul formulelor:**

$$\varepsilon = \frac{\Delta \bar{\sigma}}{\bar{\sigma}} = \frac{\Delta \pi}{\pi} + \frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta D}{D}, \quad \Delta \bar{\sigma} = \bar{\sigma} \cdot \varepsilon.$$

- 11. Prezentați rezultatul obținut sub forma:**

$$\sigma = (\bar{\sigma} \pm \Delta\bar{\sigma}) \frac{N}{m}; \varepsilon = \dots \%. \quad (1)$$

- 12. Trageti concluziile privind rezultatele obținute.**

ÎNTREBĂRI

1. Care este sensul fizic al coeficientului de tensiune superficială?
2. Deduceți formula pentru determinarea coeficientului de tensiune superficială prin metoda desprinderii picăturilor.
3. De ce este necesară o desprindere cât mai lentă a picăturilor?

b. Forma stratului superficial. Fenomene capilare

La contactul lichidelor cu corpurile solide, de rînd cu forțele de coeziune F_c , trebuie luate în considerare și cele de adeziune F_a . În funcție de corelația dintre ele, lichidul udă sau nu corpul. De exemplu, apa udă sticla, și nu udă parafina, mercurul nu udă sticla (urmăriți deplasarea coloanei de mercur dintr-un termometru), dar udă metalele.

Așadar, se pot evidenția două situații:

- 1) $F_a > F_c$ – lichidul este aderent (udă corpul solid);
- 2) $F_a < F_c$ – lichidul este neaderent (nu udă corpul solid).

În funcție de orientarea rezultantei forțelor \vec{F}_a și \vec{F}_c , stratul superficial al lichidului se curbează, luînd forma unui **menisc** concav ($\vec{F}_a > \vec{F}_c$) sau convex ($\vec{F}_a < \vec{F}_c$). Dacă masa lichidului este mare, atunci sub acțiunea forței gravitaționale stratul superficial devine o suprafață plană orizontală și meniscul se observă numai în regiunea de contact a lichidului cu solidul.

Să urmărim cum se formează meniscul și care este forma lui în cele două situații. În acest scop, vom analiza forțele de coeziune și cele de adeziune ce acționează asupra unei molecule de la suprafața lichidului dintr-un vas, lângă peretele lui. Sfera de acțiune moleculară în acest caz cuprinde toate cele trei medii, astfel încât jumătate se află în mediul solid și câte o pătrime în cele lichid și gazos (fig. 3.6). Deoarece forțele de adeziune lichid–gaz sînt foarte mici, ele se neglijează în comparație cu cele de coeziune și cele de adeziune lichid–solid și în figura 3.6 nu sînt indicate.

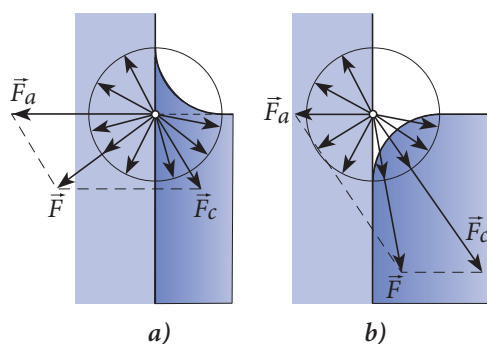


Fig. 3.6

Forța de adeziune lichid–solid este perpendiculară pe peretele vasului, iar cea de coeziune este orientată spre interiorul lichidului. Prin compunerea forțelor \vec{F}_a și \vec{F}_c se obține rezultanta lor \vec{F} , care este perpendiculară pe suprafața liberă a lichidului. Astfel, cînd $F_a > F_c$ (fig. 3.6, a), rezultanta \vec{F} este orientată în afara lichidului și meniscul este concav. Cînd $F_a < F_c$ (fig. 3.6, b), rezultanta \vec{F} este orientată spre interiorul lichidului și meniscul este convex.

În cazul în care forța de greutate a lichidului este comparabilă cu forța de tensiune superficială, atunci întreaga suprafață liberă are forma unui menisc. Asemenea situații se realizează cînd lichidele se află în vase foarte înguste (tuburi, crăpături ș.a.), numite **capilare**. Tuburile al căror diametru nu depășește un milimetru se numesc **tuburi capilare**. Datorită forțelor de tensiune superficiale mari, o suprafață liberă curbă (concavă sau convexă) exercită asupra lichidului o presiune suplimentară celei interne și orientată spre centrul de curbură.

Dacă meniscul este concav, presiunea suplimentară acționează în sens opus celei interne și lichidul urcă la o înălțime h (fig. 3.7, a). În cazul meniscului convex, presiunile suplimentară și internă au același sens și lichidul coboară cu h (fig. 3.7, b).

Înălțimea h se determină din condiția de echilibru al lichidului în tubul capilar. În acest caz rezultanta forțelor de tensiune superficială F_s este egală cu forța de greutate G a coloanei de lichid din tubul capilar, adică:

$$F_s = G. \quad (3.6)$$

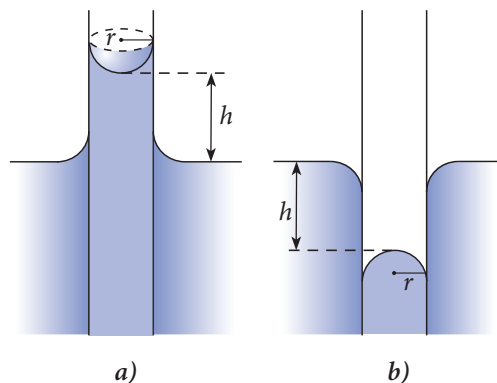


Fig. 3.7

Rezultanta F_s a forțelor de tensiune superficială se determină cu ajutorul relației (3.4), în care lungimea conturului ce mărginește suprafața liberă a lichidului este $l = 2\pi r$, adică $F_s = \sigma l = 2\pi r\sigma$, iar forța de greutate a lichidului

$$G = mg = \rho Vg = \pi r^2 h \cdot \rho g,$$

unde ρ este densitatea lichidului, iar r – raza tubului capilar.

Din condiția de echilibru (3.6) avem:

$$\rho g h \pi r^2 = 2 \pi r \sigma,$$

de unde

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}. \quad (3.7)$$

Această relație este cunoscută sub numele de **formula lui Jurin**:

Înălțimea la care se ridică un lichid aderent (coboară un lichid neaderent) într-un vas capilar este invers proporțională cu raza acestuia.

Astfel, substanțele nutritive ale plantelor se ridică de la rădăcină anume prin vase capilare, apa din sol se ridică prin pereții clădirilor dacă nu se asigură o izolație bună a temeliiilor etc.

Problemă rezolvată

1

Se dă:

$r = 1 \mu\text{m}$,
 $R = 3 \text{ mm}$,
 $\sigma = 0,072 \text{ N/m}$

SI:

10^{-6} m ,
 $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

$\Delta E - ?$

J

Determinați energia ce se degajă în procesul de contopire a picăturilor de apă cu raza $r = 1 \text{ mm}$ într-o picătură mare cu raza de 3 mm . Coeficientul tensiunii superficiale pentru apă este $\sigma = 0,072 \text{ N/m}$. Forța gravitațională se va neglija.

Rezolvare

La contopirea picăturilor mici în una mare variază aria suprafeței apei din picături și, conform relației (3.3), variază și energia potențială a stratului lor superficial. Presupunem că sînt N picături mici. Acest număr se poate determina din egalitatea volumelor de apă în cele două stări:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \cdot N = \frac{4}{3} \pi R^3,$$

de unde rezultă: $N = \left(\frac{R}{r}\right)^3$. Suprafața liberă a apei din cele N picături mici este

$$S_r = 4\pi r^2 \cdot N = 4\pi \frac{R^3}{r},$$

iar din picătura mare $S_R = 4\pi R^2$. Se observă că $S_r > S_R$ și

$$|\Delta S| = S_r - S_R = 4\pi R^2 \left(\frac{R}{r} - 1\right). \quad (3.8)$$

Așadar, suprafața apei se micșorează în timpul contopirii picăturilor mici și rezultă că ΔE de asemenea se micșorează, adică energia se degajă. Înlocuind (3.8) în (3.3), obținem:

$$\Delta E = \sigma |\Delta S| = 4\pi \sigma R^2 \left(\frac{R}{r} - 1\right); \Delta E \approx 0,024 \text{ J}.$$

Se dă:

$$\sigma = 0,072 \text{ N/m},$$

$$\rho = 7,85 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3,$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$d_{\max.} - ?$$

Pe suprafața apei este așezat un ac de oțel acoperit cu grăsimi (apa nu udă acul). Care este diametrul maxim al acului, pentru care el încă nu se scufundă? Densitatea oțelului – $\rho = 7,85 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, coeficientul tensiunii superficiale a apei – $\sigma = 0,072 \text{ N/m}$, iar accelerația gravitațională – $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.

Rezolvare

Pentru menținerea acului pe suprafața apei, este necesar ca presiunea exercitată de el p_1 pe suprafața sa de sprijin să fie mai mică sau egală cu presiunea suplimentară p_2 , exercitată de suprafața curbă a lichidului de sub ac, orientată spre centrul de curbură.

Presiunea pe care o exercită acul asupra apei:

$$p_1 = \frac{mg}{S} = \frac{\rho V \cdot g}{ld} = \frac{\rho g l \frac{\pi d^2}{4}}{ld} = \frac{\pi \rho g d}{4},$$

unde d, l, V reprezintă, respectiv, diametrul, lungimea și volumul acului, iar $\rho = 7,85 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ este densitatea oțelului.

Presiunea suplimentară obținută datorită curburii suprafeței lichidului de sub ac se prezintă astfel:

$$p_2 = \frac{F_s}{S} = \frac{\sigma \cdot 2l}{ld} = \frac{2\sigma}{d},$$

unde $\sigma = 0,072 \text{ N/m}$ este coeficientul de tensiune superficială. La calculul presiunii suplimentare s-a neglijat diametrul acului în comparație cu lungimea lui în perimetrul acestuia $2(l + d) \approx 2l$. Acul nu se va scufunda atunci când $p_1 \leq p_2$, adică

$$\frac{\pi \rho g d}{4} \leq \frac{2\sigma}{d},$$

iar diametrul maxim se va obține din egalitatea acestor presiuni. Așadar,

$$d_{\max.} = \sqrt{\frac{8\sigma}{\pi \rho g}}; d_{\max.} = 1,5 \text{ mm}.$$

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Ce reprezintă forțele de coeziune și adeziune?
2. Ce se numește strat superficial și care este acțiunea lui asupra lichidului?
3. Ce reprezintă forțele superficiale și cum acționează ele?
4. Ce arată coeficientul de tensiune superficială? Care este unitatea lui în SI?
5. Care sînt condițiile de aderență și neaderență a unui lichid? Dați exemple.
6. Cum se explică formarea meniscului la contactul solid-lichid?
7. Formulați legea lui Jurin. De care factor depinde urcarea sau coborîrea lichidelor în tuburile capilare?
8. Ce lucru trebuie efectuat împotriva forțelor de tensiune superficială pentru a mări suprafața unui balonaș de săpun cu 10 cm^2 ? Coeficientul tensiunii superficiale $\sigma = 0,025 \text{ N/m}$.

9. Cu cât se mărește energia stratului superficial al membranei de săpun, dacă aria suprafeței ei s-a mărit cu 25 cm^2 ?
10. Determinați coeficientul tensiunii superficiale a unui lichid, dacă se știe că, la introducerea capilarului de rază $r = 0,2 \text{ mm}$ în acest lichid, el se ridică la înălțimea de $2,75 \text{ cm}$. Densitatea lichidului este de 800 kg/m^3 , iar accelerația gravitațională $g = 10 \text{ m/s}^2$.
11. Într-un tub capilar aflat la suprafața Pământului apa se ridică cu 30 mm . La ce înălțime se va ridica apa în același tub capilar, dar aflat la suprafața Lunii? Se știe că accelerația gravitațională pe Pământ este de 6 ori mai mare decât pe Lună.

3.3*

STRUCTURA ȘI PROPRIETĂȚILE GENERALE ALE SOLIDELOR

Analizându-se corelația dintre forțele de atracție și cele de respingere, precum și dintre energiile cinetică și potențială de interacțiune a moleculelor, în par. 1.3 au fost definite modelele cinetico-moleculare ale stărilor de agregare ale substanței. Conform acestor modele, starea solidă diferă de starea lichidă și de cea gazoasă prin faptul că prima are **formă proprie** și **volum propriu**. Amintim că această caracteristică a solidelor este determinată de valoarea mult mai mică a energiei cinetice a moleculelor în comparație cu valoarea absolută a energiei potențiale de interacțiune, din care motiv molecula nu poate părăsi groapa de potențial formată (fig. 1.3). Cu alte cuvinte, forțele intermoleculare sînt atît de puternice, încît moleculele substanței nu pot părăsi poziția de echilibru strict determinată, efectuînd în jurul ei doar o mișcare oscilatorie.

a. Substanțe cristaline

În procesul studierii aspectului exterior al substanței solide s-a observat că în natură există multe corpuri solide caracterizate prin suprafețe netede plane orientate sub anumite unghiuri sau chiar prin poliedre regulate. Asemenea corpuri solide se numesc **cristale**. De exemplu, cristalele sării de bucătărie au forma unui cub, cele de gheață – a unei prisme hexagonale, cele de cuarț – forma unui octaedru s.a.m.d.

Cercetările experimentale ale cristalelor cu ajutorul razelor Röntgen au arătat că ele se caracterizează printr-o structură internă ordonată a particulelor constituente, adică formează o **rețea cristalină** sau **spațială**. Punctele rețelei cristaline care corespund pozițiilor de echilibru stabil al particulelor se numesc **noduri** ale rețelei. În *figura 3.8* este prezentată o rețea cristalină alcătuită din două categorii de particule aflate în nodurile rețelei. Se observă că un nod arbitrar se va regăsi în rețea pe diferite direcții cu perioade diferite: pe direcția 1-1 cu perioada a ; pe direcția 1-2 – cu perioada b ; pe direcția 1-3 – cu perioada c etc. Aranjarea ordonată a particulelor constituente ale cristalului în nodurile rețelei cristaline și repetarea periodică a acestora se numește **ordine la distanță**.

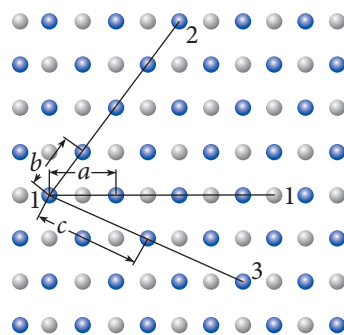


Fig. 3.8

Existența ordinii la distanță în cristale face posibilă evidențierea unității structurale a rețelei cristaline, care, fiind trasată cu o anumită perioadă de-a lungul axelor sistemului de coordonate spațial, „construiește” copia exactă a rețelei solidului cercetat. Această unitate structurală a fost numită **celulă elementară**. Forma, dimensiunile și modul de amplasare a particulelor în celula elementară determină structura cristalului în ansamblu.

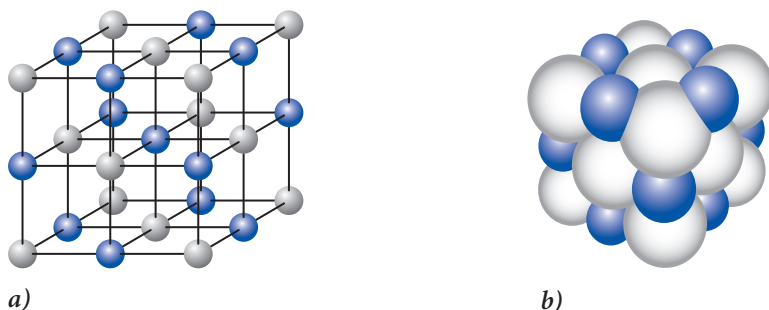


Fig. 3.9

În figura 3.9 este reprezentată schematic rețeaua cristalină a sării de bucătărie (a) și amplasarea spațială a ionilor de Na^+ (de culoare închisă) și Cl^- (de culoare deschisă) (b). Se observă că fiecare ion de clor este înconjurat de șase ioni de sodiu și, invers, fiecare ion de sodiu – de șase ioni de clor. Se spune în acest caz că rețeaua cristalină formată este o **rețea cubică cu fețe centrate**. Celula ei elementară reprezintă un cub, în vîrfurile și în centrele fețelor căruia se află ioni de un semn, iar în mijlocul muchiilor și în centrul cubului – ioni de semn opus.

Rețeaua cristalină poate avea forme destul de variate, însă nu orice formă. Este necesar ca celulele elementare din care este compusă rețeaua să se alipească una de alta fără a forma goluri. Numai în acest caz este satisfăcută condiția de echilibru stabil al particulelor – forțele de atracție și de respingere dintre ele se echilibrează și energia potențială de interacțiune devine minimă.

Ordinea la distanță caracteristică cristalelor determină proprietățile de **simetrie** ale acestora.

Simetria cristalelor este proprietatea lor de a coincide cu ele însele în urma unor operații geometrice.

Am văzut deja că la translarea celulei elementare se obține rețeaua cristalină. În asemenea situații se spune că cristalul posedă **simetrie de translație**. Există și alte operații geometrice care nu modifică rețeaua cristalină: rotații în jurul anumitor axe, reflexii față de anumite plane etc.

O proprietate excepțională a cristalelor este **anizotropia** lor, adică posibilitatea de a avea în diferite direcții proprietăți fizice diverse. Aceasta se explică prin faptul că în rețeaua cristalină pe porțiuni de lungimi egale în diferite direcții se află un număr diferit de particule. Într-adevăr, după cum se vede din figura 3.8, pe direcția orizontală 1-1 sînt 8 particule, iar pe cele oblice 1-2 și 1-3 sînt, corespunzător, cîte 5 și 3 particule. Astfel, dacă pe diferite direcții ale rețelei cristaline densitatea de particule este diferită, atunci pe aceste direcții diferă și multe alte proprietăți fizice. De exemplu,

toate cristalele se caracterizează prin anizotropia rezistenței mecanice. La fărîmîțare ele se despică ușor după anumite direcții, de-a lungul cărora rezistența mecanică este cea mai mică. Anizotropia rezistenței mecanice este foarte pronunțată la cristalele de grafit, în care atomii de carbon sînt amplasați în straturi ce se află la o distanță de 2,5 ori mai mare decît distanța dintre cei mai apropiați atomi din fiecare strat, astfel încît straturile alunecă ușor unul față de altul. Această proprietate a grafitului este folosită atunci cînd scriem cu creionul, a cărui mină este confecționată din grafit.

Cercetările experimentale au arătat că în natură există multe substanțe cristaline care nu posedă proprietatea de anizotropie. În funcție de aceasta, cristalele se împart în două grupe mari: **monocristale** și **policristale**. Monocristalele sînt corpurile cristaline ale căror particule se așază într-o rețea spațială unică. Ele sînt caracterizate atît prin proprietățile de simetrie, cît și prin cele de anizotropie. Policristalele reprezintă niște substanțe cristaline compuse din foarte multe monocristale mici, așezate haotic unul față de altul. Deși fiecare monocristal este anizotrop, policristalul este izotrop, adică proprietățile lui fizice sînt identice în toate direcțiile.

Datorită unor proprietăți mecanice, electrice, magnetice și optice, cristalele au o largă aplicare atît în știință, cît și în tehnică. De exemplu, diamantul, fiind cel mai dur material cunoscut pe Pămînt, este utilizat la prelucrarea obiectelor dure. El este folosit pe larg la construcția aparatelor mecanice de precizie înaltă. Cuarțul, mica, germaniul și siliciul, datorită unor proprietăți electrice deosebite, sînt cele mai răspîndite materiale aplicate în electrotehnică și electronică. Cristalele de turmalină, fluorină, spat-de-Islanda, rubin și altele sînt folosite la construcția diferitor dispozitive optice.

b. Substanțe amorfe

Dacă împărțim imaginar un lichid în volume foarte mici, atunci în fiecare volum mic există o distribuție ordonată a moleculelor, asemănătoare cu cea din cristale, dar nestabilă. În acest sens, structura lichidului se mai numește **cvasicristalină**. Este evident că în anumite condiții unele substanțe lichide sînt foarte aproape de starea solidă și, invers, unele substanțe solide – de cea lichidă. Substanțele care au volum propriu și formă proprie, iar în așezarea particulelor constituente există numai ordine locală, adică lipsește rețeaua cristalină, se numesc corpuri **amorse**. Sticla, sacîzul, smoala, ceara, diferite mase plastice ș.a. sînt corpuri amorfe. Există situații cînd una și aceeași substanță se poate afla atît în stare cristalină, caracterizată prin ordine la distanță, cît și în stare amorfă, unde se realizează numai ordinea locală. În *figura 3.10* este prezentată structura dioxidului de siliciu SiO_2 : a) în stare cristalină – cuarț și b) în stare amorfă – sticlă de cuarț. Se observă că în ambele cazuri atomul de siliciu

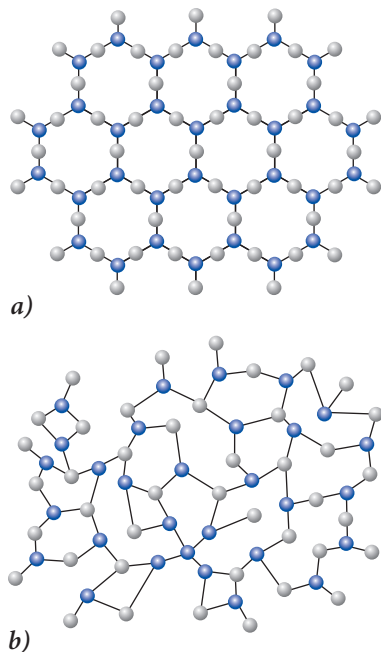


Fig. 3.10

(de culoare închisă) este înconjurat de trei atomi de oxigen (de culoare deschisă) așezați simetric, însă legătura dintre atomi este diferită: în cazul cuarțului există ordine la distanță, iar în cel al sticlei de cuarț – numai ordine locală.

Structura internă a corpurilor amorfe se deosebește de cea a lichidelor prin distanțele mai mici dintre molecule și forțe de atracție mai mari. Din această cauză, energia cinetică a moleculelor în stare amorfă este mai mică decât în stare lichidă. Astfel, pentru a transforma un corp amorf în lichid, este nevoie să mărim energia cinetică a moleculelor lui, adică să-i ridicăm temperatura. Din acest motiv, corpurile amorfe mai sînt numite și **lichide suprarăcite** sau lichide cu o fluiditate foarte mică.

Substanțele amorfe sînt izotrope, proprietățile lor fizice fiind aceleași în toate direcțiile. De exemplu, dacă vom încălzi o bucată de sticlă acoperită cu ceară într-un punct de pe suprafața ei, atunci în jurul acestui punct ceara se va topi formînd un cerc.

c. Cristale lichide

Majoritatea substanțelor se pot afla în una din cele trei stări de agregare cunoscute: solidă, lichidă sau gazoasă. Există însă substanțe care se pot afla într-o stare intermediară între lichid și solid și care manifestă în același timp atît proprietăți ale cristalelor, cît și ale lichidelor. Asemenea substanțe au fost numite **cristale lichide** sau **lichide cristaline**.

Despre existența cristalelor lichide se cunoaște încă din 1888, cînd botanistul și chimistul austriac Fredreich Rheinizer (1857–1927) a cercetat cristalele unei substanțe organice noi sintetizate din morcov. El a observat că aceste cristale au două temperaturi de topire și, respectiv, două stări lichide, una tulbure și alta transparentă. Anume starea lichidă tulbure reprezintă ceea ce ulterior a fost numită cristal lichid. Cercetările teoretice și experimentale ale structurii și proprietăților fizice ale cristalelor lichide au demonstrat că ele sînt formate din molecule de formă geometrică diferită (de cele mai multe ori sub formă de bare sau discuri). În lichidul cristalin întotdeauna există o anumită direcție determinată de forțele intermoleculare, de-a lungul căreia se orientează axele mari ale moleculelor (fig. 3.11, a) sau normala la suprafețele lor (fig. 3.11, b).

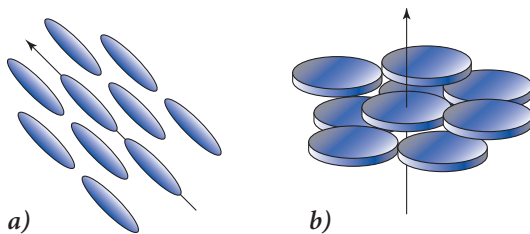


Fig. 3.11

Cristalele lichide se împart în trei grupe mari: **nematice** (de la cuvîntul grecesc *nema* „fir, ață”); **smectice** (de la cuvîntul grecesc *smegma* „săpun”) și **colesterice**.

În cristalele lichide de tip nematic moleculele sînt practic paralele între ele, iar centrele lor de masă sînt distribuite haotic (fig. 3.12, a). Din această cauză în lichidele cristaline nematice lipsește ordinea la distanță și este mai pronunțată proprietatea de fluiditate.

Lichidele cristaline de tip smectic (fig. 3.12, b) au centrele de masă ale moleculelor dispuse în plane echidistante, ce alcătuiesc straturi smectice care pot aluneca ușor unul pe altul. În interiorul straturilor moleculele sînt distribuite astfel, încît axele lor mari

sînt orientate paralel cu normala stratului sau formează diferite unghiuri cu aceasta. Deoarece în straturi există ordine la distanță, aceste cristale lichide sînt anizotrope și au o viscozitate mare.

În cristalele lichide colesterice (fig. 3.12, c), moleculele sînt amplasate în niște straturi răsucite într-o linie elicoidală. Fiecare strat prezintă o ordonare a moleculelor caracteristică lichidelor cristaline nematice, iar structura de straturi este asemănătoare cristalelor lichide smectice.

S-a constatat că amplasarea moleculelor în lichidele cristaline se modifică sub acțiunea diferitor factori externi, cum ar fi temperatura, presiunea, cîmpurile electric și magnetic. Ca rezultat se modifică proprietățile optice ale cristalelor lichide (culoarea, transparența ș.a.). Aceste particularități în comportamentul cristalelor lichide au deschis calea spre numeroase aplicații ale acestora.

Una dintre primele aplicații ale lichidelor cristaline a fost construirea în anii '60 ai secolului trecut a dispozitivelor indicatoare folosite la ceasurile de mînă și la calculatoarele de buzunar.

În prezent, utilizarea cristalelor lichide este foarte largă. Datorită sensibilității lor la variațiile de temperatură, acestea sînt folosite pe larg în electronică și medicină. Pe tranzistoare, circuite integrate și alte elemente electronice sînt lipite pelicule din cristale lichide. Elementele supraîncălzite sau cele reci (care nu funcționează) se evidențiază imediat prin culorile aprinse ale acestor pelicule. Un indicator din cristal lichid lipit pe corpul bolnavului arată existența inflamațiilor sau a tumorilor interne. Lichidele cristaline sînt folosite și pentru detectarea vaporilor dăunători ai diferitor compuși chimici, a diverselor radiații periculoase pentru om.

Un domeniu relativ nou și foarte important de folosire a cristalelor lichide este tehnica informațională. Deja se utilizează pe larg televizoarele și monitoarele color LCD (Liquid Crystal Display). Acestea dau o imagine mult mai calitativă și folosesc energii mult mai mici. S-a demonstrat posibilitatea obținerii cu ajutorul cristalelor lichide a imaginilor stereo, deci nu este departe momentul cînd vor apărea televizoarele stereo.

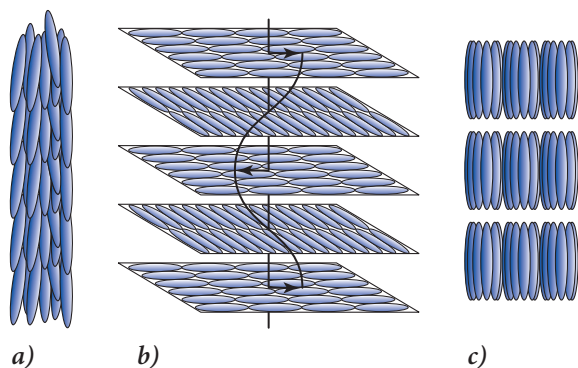


Fig. 3.12

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Ce reprezintă rețeaua cristalină? Dar nodurile ei?
2. Caracterizați noțiunea de „ordine la distanță”. Ce proprietăți ale cristalelor sînt determinate de existența ordinii la distanță?
3. Ce reprezintă celula elementară?
4. Ce reprezintă monocristalele? Dar policristalele? Prin ce se deosebesc ele?

5. Dați exemple de utilizare a cristalelor.
6. Care corpuri se numesc amorse?
7. Ce reprezintă structura internă a corpurilor amorse?
8. De ce corpurile amorse sînt numite lichide suprarăcite?
9. Ce reprezintă cristalele lichide?
10. Cum se clasifică lichidele cristaline? Care este structura lor?
11. Care sînt aplicațiile cristalelor lichide?

3.4* DEFORMAREA CORPURILOR SOLIDE. LEGEA LUI HOOKE

Orice acțiune asupra corpului solid urmată de o modificare a formei sau volumului său se numește **deformare**. După cum arată experiența, orice corp solid poate fi deformat, însă de cele mai multe ori deformațiile sînt atît de mici, încît nu se observă cu ochiul liber. De exemplu, deformarea unei bare de oțel practic nu se observă, pe cînd un fir de cauciuc se poate alungi pînă la dublarea lungimii sale inițiale. În funcție de modul de aplicare a acțiunii exterioare, deosebim mai multe tipuri de deformări: de alungire (fig. 3.13, a), de comprimare (fig. 3.13, b), de încovoiere, de torsiune (răsucire) ș.a.

Să cercetăm mai detaliat deformația de alungire a solidelor. Mărima acestei deformații se caracterizează prin **alungirea absolută** $\Delta l = l - l_0$, unde l_0 este lungimea solidului în stare nedeformată, iar l – lungimea lui după producerea deformării. Deoarece această mărime depinde de lungimea în stare nedeformată l_0 , este mai comodă utilizarea altei mărimi, numită **alungire relativă** și notată cu litera grecească ε . Ea arată ce parte din lungimea în stare nedeformată l_0 constituie alungirea absolută Δl :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}. \quad (3.9)$$

Să analizăm acum deformarea de alungire a unei bare din punctul de vedere al forțelor ce o produc. După producerea deformării, bara se află în echilibru și rezultă că orice punct al ei este tot în echilibru. Acest lucru însă este posibil dacă în punctul dat acționează niște forțe interne \vec{F} și \vec{N} (fig. 3.13) egale în modul cu cele externe \vec{F} și \vec{N} . Ce reprezintă forțele interne și care este rolul lor?

Este cunoscut că așezarea moleculelor în rețeaua cristalină constituie o stare de echilibru stabil determinată de valoarea minimă a energiei lor potențiale de interacțiune și de egalitate a forțelor de atracție și de respingere dintre ele. Prin acțiunea forțelor externe \vec{F} și \vec{N} distanța dintre molecule se mărește, iar odată cu aceasta încep să prevaleze forțele de atracție dintre molecule, care tind să readucă sistemul în starea inițială de echilibru stabil. Dacă delimităm în bara supusă deformației de alungire

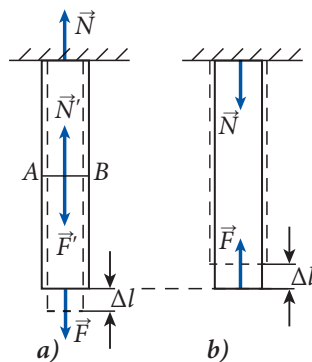


Fig. 3.13

un strat monomolecular AB (fig. 3.13, a), atunci forța \vec{F} reprezintă rezultanta forțelor cu care moleculele părții de jos a barei le atrag pe cele din stratul AB , iar \vec{N}' – rezultanta forțelor cu care moleculele părții de sus le atrag pe cele din stratul AB . Cu cât sînt mai mari forțele externe, cu atît mai mari vor fi și cele interne. Așadar, forțele interne sînt niște forțe intermoleculare care se opun deformării. Ele au fost numite **forțe de elasticitate** și acționează atît în interiorul corpului, cît și asupra corpurilor exterioare care produc deformarea. Este evident că pentru una și aceeași alungire valoarea forței de elasticitate F_e a corpului depinde de aria secțiunii lui transversale. Cu cît aceasta din urmă este mai mare, cu atît mai mare este și forța F_e .

Mărimea egală numeric cu forța deformatoare F ce acționează pe o unitate de suprafață S a corpului deformat se numește **tensiune mecanică** sau **efort unitar**:

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (3.10)$$

Unitatea tensiunii mecanice în SI reprezintă newtoni pe metru pătrat (N/m^2) sau pascali (Pa).

Tensiunea mecanică caracterizează proprietatea corpurilor de a se opune deformării. După cum arată experiența, pentru majoritatea corpurilor solide este caracteristică dependența tensiunii mecanice de alungirea relativă (diagrama alungirilor), avînd aspectul din figura 3.14. Se observă că porțiunea Oa din grafic reprezintă o dependență direct proporțională dintre tensiunea mecanică și alungirea relativă. Astfel, pentru valori ale tensiunii mecanice din intervalul $(0, \sigma_e)$ corpurile solide au proprietatea de a-și restabili forma și volumul inițial. Această proprietate este numită **elasticitate**, iar deformarea – **elastică**. Tensiunea σ_e , care corespunde punctului a de pe grafic, la capătul porțiunii liniare, poartă numele de **limită a elasticității**.

Porțiunea ad din grafic se caracterizează prin alungiri considerabile la creșteri mici ale tensiunii mecanice. După înlăturarea forței deformatoare, alungirea relativă se micșorează, însă nu în corespundere cu dependența $ba0$, ci cu dreapta bO' . Așadar, pentru valori ale tensiunii mecanice care depășesc limita elasticității σ_e , corpurile se caracterizează prin **deformații remanente**. Proprietatea corpurilor de a avea deformații remanente se numește **plasticitate**, iar deformarea – **plastică**. Punctului d de pe grafic îi corespunde tensiunea mecanică σ_r , numită rezistență de rupere, la care forța elastică nu se mai poate opune forței deformatoare, și corpul deformat se rupe.

Porțiunea liniară din diagrama alungirilor (fig. 3.14) se exprimă printr-o relație matematică simplă:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (3.11)$$

unde E constituie un coeficient de proporționalitate numit **modulul lui Young** sau **modulul de elasticitate** și este numeric egal cu tensiunea mecanică σ care apare în materialul supus deformației la o alungire relativă ε egală cu unitatea. Trebuie însă

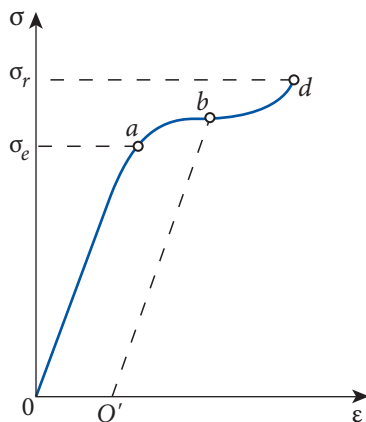
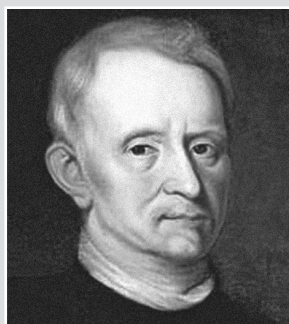


Fig. 3.14



A cercetat fenomenele ce țin de transferul de căldură, elasticitate, optică și mecanică cerească. A introdus împreună cu Ch. Huygens (1665) punctele de reper pentru termometru – de topire a gheții și de fierbere a apei. A perfecționat construcția microscopului cu care a efectuat un șir de experiențe, în urma cărora a ajuns la descoperirea structurii celulare a organismelor. În anul 1672 a efectuat experiențe referitoare la difracția luminii și a înaintat ipoteza despre caracterul transversal al undelor de lumină. Înaintea lui Newton (1674), a enunțat ideea despre gravitație, iar în 1680 a ajuns la concluzia că forța gravitațională este invers proporțională cu pătratul distanței.

să menționăm că asemenea alungiri nu se realizează practic. După cum arată experiența, majoritatea corpurilor solide au alungiri relative de ordinul $10^{-3} \div 10^{-2}$.

Ecuția (3.11) reprezintă **legea lui Hooke** și a fost formulată pentru prima dată în anul 1660 de fizicianul englez Robert Hooke (1635–1703):

În limitele elasticității tensiunea mecanică a corpului deformat este direct proporțională cu alungirea lui relativă.

Dacă introducem (3.9) și (3.10) în (3.11), obținem legea lui Hooke sub forma studiată în clasa a X-a la mecanică:

$$F = ES \frac{\Delta l}{l_0}.$$

Explicația legii lui Hooke este simplă dacă analizăm graficul forțelor intermoleculare (fig. 1.3, b). Se observă că pentru variații mici ale distanței dintre molecule în jurul poziției de echilibru r_0 forța intermoleculară este proporțională alungirii absolute $F \sim (r - r_0) \sim \Delta l$. Acțiunea ei, în acest interval al distanțelor, întotdeauna readuce moleculele la pozițiile lor inițiale de echilibru.

Problemă rezolvată

1

Se dă:

$x = \sigma_r / \sigma = 5$,
 $m = 200 \text{ kg}$,
 $\sigma_r = 1,1 \cdot 10^8 \text{ Pa}$,
 $E = 7 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$
 $S = ?$; $\varepsilon = ?$

Determinați aria secțiunii transversale și alungirea relativă a unei bare de aluminiu cu coeficientul de siguranță $x = 5$, la capătul căreia este suspendat un obiect de masă $m = 200 \text{ kg}$. Pentru aluminiu: rezistența de rupere $\sigma_r = 1,1 \cdot 10^8 \text{ Pa}$; modulu lui Young $E = 7 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$.

Coeficientul de siguranță reprezintă un număr care arată de câte ori rezistența de rupere σ_r este mai mare decât tensiunea mecanică σ , care apare în bara de aluminiu în urma forței de greutate aplicate: $x = \frac{\sigma_r}{\sigma}$.

Rezolvare

Deoarece forța deformatoare este cea de greutate, din (3.10) avem:

$$S = \frac{mg}{\sigma} = \frac{mgx}{\sigma_r}; \quad S \approx 0,91 \text{ cm}^2.$$

Din legea lui Hooke (3.11), pentru alungirea relativă obținem:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\sigma_r}{xE}; \varepsilon \approx 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ sau } \varepsilon \approx 0,03\%.$$

Problemă rezolvată

2

Se dă:

$$l_0 = 1 \text{ m},$$

$$m = 5 \text{ kg},$$

$$S = 10^{-6} \text{ m}^2,$$

$$E = 1,08 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$$

$$\Delta l = ?$$

Un cablu de cupru cu lungimea de 1 m este fixat la un capăt astfel încât se poate roti într-un plan vertical. La capătul liber al cablului se află legată o greutate cu masa de 5 kg. Cablul împreună cu greutatea sînt abătute de la verticală cu un unghi de 90° și lăsate liber. Care va fi alungirea cablului în punctul inferior al traiectoriei de mișcare a corpului? Aria secțiunii transversale a cablului este de 1 mm^2 , iar masa lui se neglijează. Modulul lui Young: $E = 1,08 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$.

Rezolvare

În conformitate cu legea lui Hooke, alungirea cablului se determină din relația

$$\Delta l = \frac{Fl_0}{ES},$$

unde l_0 și S reprezintă lungimea cablului nedeformat și aria secțiunii lui transversale, iar F este forța care întinde cablul în punctul inferior al traiectoriei (fig. 3.15). În acest punct asupra corpului acționează forța de greutate $m\vec{g}$ și forța de tensiune din cablu \vec{T} . Legea a doua a lui Newton în proiecții pe direcția verticală are aspectul

$$T - mg = ma_c,$$

unde $a_c = v^2/l$ reprezintă accelerația centripetă, iar l este lungimea cablului întins. Pentru determinarea vitezei v în punctul cercetat, aplicăm legea conservării energiei. În poziția inițială (cablu cu greutatea abătută de la verticală cu 90°), corpul posedă doar energie potențială mgl , iar în cea finală (punctul inferior al traiectoriei) – doar energie cinetică $\frac{mv^2}{2}$. Așadar,

$$\frac{mv^2}{2} = mgl,$$

de unde $v^2 = 2gl$. Astfel, din legea a doua a lui Newton, pentru forța de tensiune din cablu T în poziția cercetată, egală conform legii a treia a lui Newton cu forța F de întindere a cablului, avem:

$$T \equiv F = m(a_c + g) = m\left(\frac{v^2}{l} + g\right) = m\left(\frac{2gl}{l} + g\right) = 3mg,$$

iar pentru alungirea cablului:

$$\Delta l = \frac{3mgl_0}{ES}; \Delta l = 1,38 \text{ mm}.$$

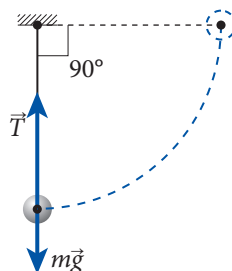


Fig. 3.15

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Ce se numește deformare?
2. Care sînt tipurile principale de deformări? Dați exemple.
3. Ce reprezintă alungirea relativă și ce caracterizează ea?

4. Ce reprezintă forțele de elasticitate și care este rolul lor?
5. Ce se numește tensiune mecanică? Care este unitatea ei în SI?
6. Ce reprezintă limita elasticității? Caracterizați deformațiile plastice.
7. Formulați legea lui Hooke. Dați explicația cinetico-moleculară a acestei legi.
8. Un cablu cu lungimea de 6,8 m s-a alungit cu 3,4 mm sub acțiunea unei forțe exterioare. Care este alungirea relativă a cablului?
9. O bară cu lungimea de 2 m și aria secțiunii transversale de 5 cm² este fixată la capătul de sus, iar la cel de jos este suspendat un corp de greutate $P = 5$ kN. Modulul lui Young pentru această bară este $E = 70$ GPa.
Determinați:
 - a) tensiunea mecanică a materialului din care este confecționată bara;
 - b) alungirea relativă a barei;
 - c) alungirea absolută a barei.

3.5*

DILATAREA SOLIDELOR ȘI A LICHIDELOR

După cum arată experiența, majoritatea corpurilor solide și lichide, ca și gazele, la încălzire își măresc volumul. Deși structura internă și proprietățile solidelor și lichidelor sînt diferite, mecanismul dilatării termice este același. Într-adevăr, încălzirea substanței este însoțită de creșterea energiei cinetice a moleculelor. În *figura 3.16* este reprezentată dependența energiei potențiale de interacțiune a două molecule (A și B) de distanța dintre ele (*fig. 1.3, c*). Dacă se mărește energia cinetică a moleculelor pînă la E_{c1} (starea cu temperatura T_1), atunci moleculele se află la distanța medie $r_1 > r_0$ una de alta. Dacă se mărește temperatura sistemului pînă la T_2 , atunci energia cinetică a moleculelor devine $E_{c2} > E_{c1}$, iar distanța medie dintre ele – $r_2 > r_1$ (*fig. 3.16*). Mărirea distanței medii dintre molecule se explică prin nesimetria curbei energiei potențiale a sistemului (*fig. 3.16*). Cînd energia sistemului crește, punctul de echilibru stabil se deplasează în sensul variației mai lente a energiei potențiale, adică în sensul creșterii distanței dintre molecule. În *figura 3.16* această deplasare este reprezentată printr-o linie întreruptă.

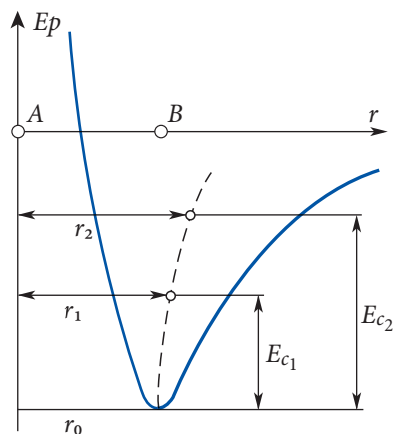


Fig. 3.16

Graficul energiei potențiale, în funcție de distanța dintre molecule, permite numai o explicație calitativă a fenomenului dilatării termice. Pentru o descriere cantitativă însă este nevoie să apelăm la rezultatele experimentale. S-a demonstrat că atât pentru solide, cît și pentru lichide variația relativă a volumului $\Delta V/V_0$ într-un interval mic de temperaturi este direct proporțională cu variația temperaturii ΔT :

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \beta \Delta T. \quad (3.12)$$

Să analizăm relația (3.12), în care $\Delta V = V - V_0$, unde V_0 este volumul corpului la temperatura $t_0 = 0^\circ\text{C}$, iar $\Delta T = t - t_0 = t$. Obținem: $\frac{V - V_0}{V_0} = \beta t$ sau

$$V = V_0(1 + \beta t), \quad (3.13)$$

unde coeficientul de proporționalitate β este numit **coeficient de dilatare termică în volum** și depinde de natura substanței. El arată cu ce parte din volumul inițial luat la 0°C variază volumul corpului la încălzirea lui cu 1°C (1K). Întrucât variația relativă a volumului este adimensională, din (3.12) rezultă că în SI $[\beta] = \text{K}^{-1}$. Valoarea numerică a coeficientului β este diferită pentru solide și lichide. După cum arată măsurătorile, pentru lichide $\beta \sim (10^{-3} \div 10^{-4})\text{K}^{-1}$, iar pentru solide el are valori mult mai mici – $(10^{-5} \div 10^{-6})\text{K}^{-1}$. Iată de ce dilatarea solidelor se observă greu cu ochiul liber.

Relațiile (3.12) și (3.13) pentru dilatarea termică în volum a lichidelor și solidelor sînt valabile dacă masa de substanță rămîne constantă în procesul dilatării. Aceasta înseamnă că densitatea solidelor și lichidelor depinde de temperatură. Într-adevăr, densitatea substanței la 0°C este $\rho_0 = \frac{m}{V_0}$, iar la o temperatură t densitatea $\rho = \frac{m}{V}$ și din (3.13) obținem:

$$\rho = \frac{\rho_0}{(1 + \beta t)}, \quad (3.14)$$

de unde rezultă că la încălzire densitatea lichidelor și solidelor se micșorează, iar la răcire – crește.

În natură sînt cunoscute și devieri de la dependențele (3.13) sau (3.14). De exemplu, la răcirea apei volumul ei se micșorează (densitatea crește) continuu pînă la 4°C . Dar la răcirea în continuare pînă la 0°C , cînd are loc solidificarea ei, dependențele (3.13) și (3.14) nu se mai respectă. În acest interval de temperaturi $(4 \div 0)^\circ\text{C}$ are loc un proces invers: la micșorarea temperaturii volumul se mărește, iar densitatea scade. Această anomalie se explică prin particularitățile structurii interne a substanței. Începînd cu temperatura de 4°C , are loc restructurarea ordinii locale. Între moleculele de apă iau naștere legături caracteristice pentru ordinea la distanță și formarea rețelei cristaline a gheții, care conține niște goluri în interiorul ei. Anume aceste goluri determină creșterea volumului apei în intervalul de temperaturi de la 4 pînă la 0°C . Această anomalie mai este cunoscută și pentru alte substanțe: bismutul (Bi), galiul (Ga), germaniul (Ge), siliciul (Si), fonta.

Dilatarea termică a solidelor și lichidelor are loc în toate direcțiile în același mod. Aceasta se explică prin izotropia lichidelor și a majorității corpurilor solide, care au o structură policristalină. De multe ori însă dilatarea solidelor este mai pronunțată într-o anumită direcție, de exemplu, șinele căii ferate, țevile unei conducte de aburi ș.a.m.d. În asemenea cazuri are loc o dilatare liniară a solidelor.

Dacă un corp are lungimea l_0 la temperatura $t_0 = 0^\circ\text{C}$, iar la o temperatură t – lungimea l , atunci la încălzirea lui cu $\Delta T = t - t_0 = t$, alungirea absolută este $\Delta l = l - l_0$. Experiența arată că alungirea relativă $\frac{\Delta l}{l_0}$ este proporțională cu ΔT :

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \cdot \Delta T. \quad (3.15)$$

Coeficientul de proporționalitate α este numit **coeficient al dilatării termice liniare**

și arată cu ce parte din lungimea inițială se alungește corpul aflat la 0°C după încălzirea lui cu 1°C .

Din (3.15) pentru lungimea corpului la o temperatură t se obține:

$$l = l_0 (1 + \alpha t). \quad (3.16)$$

Între coeficienții dilatării termice liniare și volumice (α și β) există o relație foarte simplă. Pentru obținerea ei, să cercetăm un corp de forma unui cub, care la temperatura de 0°C are latura cu lungimea l_0 și volumul $V_0 = l_0^3$. După încălzirea lui pînă la temperatura t , volumul conform relației (3.13) devine:

$$V = V_0(1 + \beta t) = l_0^3 (1 + \beta t).$$

Pe de altă parte, după dilatarea liniară a fiecărei laturi a cubului, din (3.16) avem:

$$V = l^3 = l_0^3 (1 + \alpha t)^3.$$

Din aceste două expresii obținem:

$$1 + \beta t = 1 + 3\alpha t + 3\alpha^2 t^2 + \alpha^3 t^3.$$

Deoarece α este foarte mic, termenii cu α^2 și α^3 pot fi neglijăți și se obține:

$$\beta = 3\alpha. \quad (3.17)$$

Întrucît în tabelele constantelor de material sînt introduși numai coeficienții dilatării termice liniare, este mai rațional ca relația (3.13) să se scrie sub forma:

$$V = V_0(1 + 3\alpha t). \quad (3.18)$$

Judecînd în același mod, pentru determinarea ariei suprafeței S a unui corp solid la temperatura t , se poate obține relația:

$$S = S_0(1 + 2\alpha t), \quad (3.19)$$

unde S_0 este aria suprafeței corpului la 0°C .

Problemă rezolvată

1

Se dă:

$$Q = 2 \text{ MJ},$$

$$\rho = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3},$$

$$c = 0,46 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}},$$

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

$$\Delta V - ?$$

SI:

$$2 \cdot 10^6 \text{ J}$$

$$\text{m}^3$$

Unei bile de fier i s-a comunicat o cantitate de căldură egală cu 2 MJ. Cu cît s-a mărit volumul bilei în urma încălzirii?

Rezolvare

În conformitate cu (3.12), variația volumului bilei este direct proporțională cu variația temperaturii:

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T = 3\alpha V_0 \Delta T,$$

unde β (α) reprezintă coeficientul de dilatare termică în volum (liniară), iar V_0 este volumul bilei la temperatura 0°C .

Canitatea de căldură necesară pentru încălzirea bilei cu ΔT :

$$Q = mc\Delta T,$$

unde c este căldura specifică a fierului (se ia din tabele), iar masa bilei poate fi exprimată prin densitatea ρ și volumul V_0 : $m = \rho V_0$. Atunci:

$$\Delta T = \frac{Q}{mc} = \frac{Q}{\rho V_0 c}.$$

Pentru variația volumului bilei la încălzirea ei, obținem:

$$\Delta V = \frac{3\alpha V_0 Q}{\rho V_0 c} = \frac{3\alpha}{\rho c} Q; \Delta V \approx 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 = 20 \text{ cm}^3.$$

Problemă rezolvată 2

Se dă:

$$\Delta T = 20 \text{ K},$$

$$E = 2,2 \cdot 10^{11} \text{ Pa},$$

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

σ - ?

O bară de oțel este fixată rigid între doi pereți. Determinați tensiunea mecanică care apare la încălzirea cu $\Delta T = 20 \text{ K}$. Pentru oțel modulul lui Young este $E = 2,2 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$, iar coeficientul dilatării termice liniare $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Rezolvare

Deoarece bara este fixată rigid între cei doi pereți și nu are posibilitatea de a se dilata, în ea apare o tensiune mecanică, care, conform legii lui Hooke (3.11), este:

$$\sigma = E\varepsilon,$$

unde $\varepsilon = \Delta l/l_0$ constituie alungirea relativă.

Această alungire s-ar fi făcut pe seama încălzirii, dacă bara ar fi fost liberă. Din (3.15) avem:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \Delta T.$$

După introducerea acestei relații în legea lui Hooke, obținem:

$$\sigma = E\alpha\Delta T; \sigma = 66 \text{ MPa}.$$

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Care este mecanismul dilatării termice?
2. Ce reprezintă coeficientul dilatării termice în volum și care este unitatea lui în SI?
3. Care sînt deosebirile dilatării termice la solide și lichide?
4. Cum depinde densitatea solidelor și lichidelor de temperatură?
5. Ce reprezintă coeficientul dilatării termice liniare?
6. Care este legătura dintre coeficienții dilatării termice liniare și în volum?
7. Într-un obiect de oțel există o cavitate, al cărei volum la temperatura de 0°C este egal cu 200 cm^3 . Care este volumul acestei cavități la temperatura de 10°C ?
8. Cu cîte procente se mărește volumul unui lichid la variația temperaturii cu 25 K ? Coeficientul dilatării termice în volum pentru acest lichid este de 10^{-3} K^{-1} .

9. Lungimea unei sîrme de cupru la temperatura de 0°C este de 5 m. Pînă la ce temperatură trebuie încălzită ea, pentru a obține o alungire de 3 cm? Coeficientul dilatării liniare a cuprului este de $1,7 \cdot 10^{-5}\text{K}^{-1}$.

3.6*

VAPORIZAREA ȘI CONDENSAREA

Pînă acum au fost studiate proprietățile fizice ale substanței aflate în una din stările de agregare: solidă, lichidă sau gazoasă. Experiența însă arată că în anumite condiții de presiune și temperatură substanța se poate afla concomitent în diferite stări de agregare, numite faze, sau poate trece complet dintr-o stare în alta. În acest caz se spune că are loc o **tranziție** sau **transformare de fază**.

Vom studia mai întîi transformarea de fază lichid–gaz.

Procesul trecerii substanței din stare lichidă în stare gazoasă se numește vaporizare, iar cel invers, de transformare a gazului în lichid – condensare.

Vaporizarea lichidului se realizează sub formă de **evaporare** sau de **fierbere**.

a. Evaporarea. Vaporii nesaturanți și vaporii saturanți

Vaporizarea care se realizează la orice temperatură, dar numai la suprafața liberă a lichidului, se numește **evaporare**.

Să analizăm procesul de evaporare a unui lichid din punctul de vedere al teoriei cinetico-moleculare. Este cunoscut că suprafața liberă a lichidului reprezintă un strat superficial, asupra moleculelor căruia acționează forțe de coeziune orientate spre interior și care frînează ieșirea lor din lichid. Paralel cu mișcarea de oscilație, moleculele lichidului mai realizează și o mișcare de translație (fig. 1.4, b) cu o viteză medie care crește odată cu mărirea temperaturii. Dacă în urma ciocnirilor dintre moleculele stratului superficial unele din ele capătă viteze mai mari decît cea medie, atunci energiile lor cinetice pot fi suficiente pentru efectuarea unui lucru mecanic împotriva forțelor de coeziune. Anume aceste molecule pot părăsi suprafața liberă a lichidului, formînd deasupra lui faza gazoasă sau **vaporii** lichidului.

Din figura 3.17 se observă că asupra moleculelor, ale căror centre se află la o distanță de la suprafața liberă a lichidului deasupra lui mai mică decît raza sferei de acțiune moleculară r_m , acționează forțe de coeziune cu rezultanta \vec{F}_c orientată spre interiorul lichidului și ele vor fi întoarse înapoi. Așadar, vor putea părăsi lichidul numai acele molecule care au o energie cinetică mai mare decît lucrul mecanic necesar pentru învingerea forțelor moleculare de coeziune ce acționează în stratul de grosime r_m . Deoarece moleculele care părăsesc

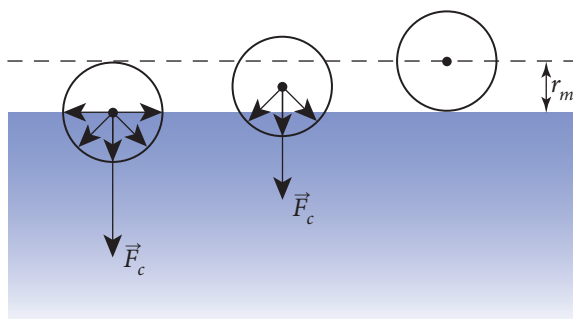


Fig. 3.17

lichidul au primit în urma ciocnirilor cu cele rămase o parte din energia cinetică a acestora, rezultă că energia cinetică medie a moleculelor lichidului se micșorează și deci în urma evaporării temperatura lichidului scade. Astfel se explică senzația de frig pe care o avem atunci când ieșim din apă.

În urma mișcării haotice, unele molecule din faza gazoasă a lichidului acced în stratul de grosime r_m (fig. 3.17) și forțele de coeziune le reîntorc în lichid. Aceasta înseamnă că odată cu fenomenul evaporării se realizează și cel al condensării vaporilor de lichid. Moleculele care se întorc în lichid au o energie cinetică mai mare decât cele ale lichidului și o parte din ea se transmite moleculelor lui. De aceea energia cinetică medie a moleculelor lichidului se mărește și temperatura lui crește.

Așadar, la suprafața lichidului au loc în același timp două fenomene: de evaporare (cu consum de energie) și de condensare (cu cedare de energie). Dacă predomină procesul de evaporare, lichidul se răcește, iar dacă predomină cel de condensare – se încălzește.

Să cercetăm fenomenul evaporării unui lichid ce se află într-un vas închis și ocupă numai o parte din volumul lui. În acest caz se constată că nivelul lichidului rămâne neschimbat. Rezultă că într-o unitate de timp numărul moleculelor care părăsesc lichidul prin evaporare este egal cu numărul moleculelor ce revin în lichid prin condensare. Temperatura lichidului se micșorează în urma evaporării exact cu atât cu cât ea se mărește în urma condensării. Prin urmare, lichidul și vaporii săi se află în stare de echilibru. Întrucât procesele de evaporare și condensare continuă cu aceeași intensitate, acest echilibru este unul în permanentă modificare și de aceea se numește **echilibru dinamic**.

Vaporii care se află în echilibru dinamic cu lichidul din care provin se numesc vaporii saturați.

Este evident că la o anumită temperatură vaporii saturați conțin un număr maxim de molecule în unitatea de volum, adică au o concentrație și o densitate ρ_s maxime, exercitând asupra lichidului o presiune p_s maximă. Valorile maxime ale densității și presiunii depind de natura lichidului. Lichidele cu forțe de coeziune mari ajung la starea de echilibru dinamic cu vaporii săi la densități ρ_s și presiuni p_s mai mici decât cele cu forțe de coeziune mici. Într-adevăr, la o temperatură dată numărul de molecule care părăsesc lichidul este mai mare atunci când ele trebuie să efectueze un lucru mecanic mai mic împotriva forțelor de coeziune.

Vaporii care nu se află în echilibru dinamic cu lichidul din care provin se numesc vaporii nesaturați.

Cu alte cuvinte, vaporii sînt nesaturați atunci când predomină evaporarea sau când lichidul s-a evaporat complet. Presiunea și densitatea vaporilor nesaturați întotdeauna sînt mai mici decât cele ale vaporilor saturați la aceeași temperatură.

După cum arată experiența, vaporii nesaturați se supun legilor gazului ideal: Boyle–Mariotte, Gay–Lussac, Charles și Clapeyron–Mendeleev, studiate în par. 1.8. Proprietățile lor sînt cu atât mai apropiate de cele ale gazului ideal, cu cât vaporii se află mai departe de saturație.

Proprietățile vaporilor saturați pot fi studiate cu ajutorul instalației din *figura 3.18*. Ea constă dintr-un tub cilindric din sticlă fixat cu un suport S într-un vas cu apă. Tubul are la capătul deschis o pîlnie, două robinete (1 și 2) și este conectat la un manometru M , cu ajutorul căruia se măsoară presiunea.

Se închide robinetul 1, robinetele 2 și 3 se deschid și cu ajutorul unei pompe se elimină aerul din tub. Când manometrul indică o presiune apropiată de zero, robinetele 2 și 3 se închid, iar în pîlnia tubului se toarnă lichidul, vaporii căruia dorim să-i studiem (de exemplu, eterul).

Deschidem robinetul 1 și introducem cîteva picături de eter în spațiul vidat dintre robinetele 1 și 2 cu volumul V_1 . Deoarece în interiorul tubului eterul în stare lichidă lipsește, iar manometrul indică o anumită presiune, rezultă că **evaporarea în vid are loc practic instantaneu**.

Adăugînd eter prin robinetul 1, se observă că presiunea vaporilor crește pînă la valoarea p_s , adică pînă cînd aceștia devin saturați. În acest moment în tub apar primele picături ale fazei lichide, după care presiunea nu se mai modifică, oricare ar fi masa eterului introdus.

Așadar,

la o temperatură dată presiunea vaporilor saturați rămîne constantă și nu depinde nici de masa lichidului, nici de cea a vaporilor în contact cu el.

Dacă se ia o cantitate mare de eter și se deschide robinetul 2, atunci volumul ocupat de vaporii saturați se mărește pînă la V_2 , însă indicația manometrului rămîne neschimbată. Într-adevăr, creșterea volumului conduce la dereglarea echilibrului dinamic și o nouă cantitate de eter se evaporă instantaneu, mărind astfel numărul de molecule ale vaporilor, deci și masa lor. Numărul de molecule crește pînă cînd se obține aceeași valoare maximă a concentrației, adică pînă cînd se restabilește echilibrul dinamic și vaporii sînt iarăși saturați, exercitînd aceeași presiune p_s indicată de manometru. Așadar,

presiunea vaporilor saturați nu depinde de volumul pe care ei îl ocupă.

În *figura 3.19* este reprezentată o izotermă a vaporilor unui lichid. Porțiunea AB arată că presiunea vaporilor saturați nu depinde nici de volumul ocupat, nici de masa vaporilor sau a lichidului din care provin. Dacă în urma creșterii volumului tot lichidul se transformă în vaporii, atunci ei devin nesaturați și

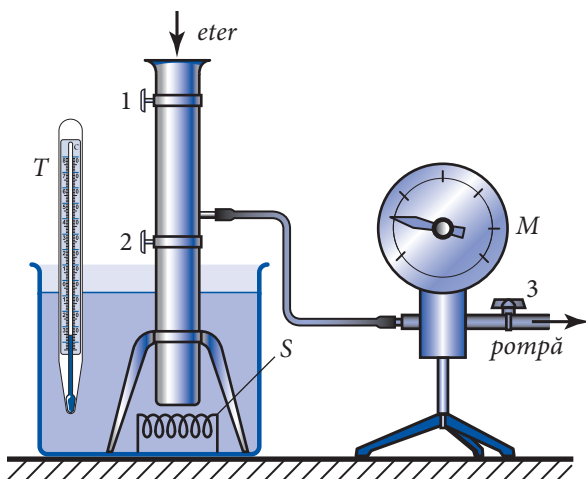


Fig. 3.18

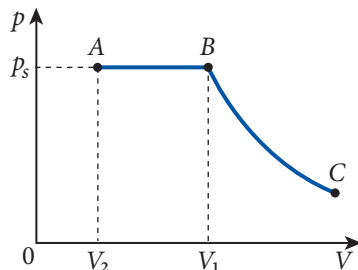


Fig. 3.19

dependența presiunii de volum este descrisă aproximativ de legea lui Boyle–Mariotte (arcul de hiperbolă BC).

Dependența presiunii vaporilor saturați de temperatură la volum constant se studiază cu ajutorul aceleiași instalații (fig. 3.18). Prin încălzirea apei din vas se mărește temperatura vaporilor de eter. Notînd indicațiile termometrului T și ale manometrului M , se observă că

la creșterea temperaturii presiunea vaporilor saturați se mărește.

Această dependență însă nu este liniară, cum a fost în cazul gazului ideal. Cu alte cuvinte, vaporii saturați nu se supun legii lui Charles. În figura 3.20 este reprezentată calitativ dependența presiunii vaporilor unui lichid de temperatură. Porțiunea AB arată că presiunea vaporilor saturați crește mai repede decît cea a gazului ideal (linia întreruptă din fig. 3.20). Aceasta se explică prin faptul că presiunea vaporilor saturați crește din două motive. În primul rînd, din cauza creșterii energiei cinetice medii a moleculelor vaporilor și, în al doilea rînd, din cauza creșterii numărului de molecule în unitatea de volum, adică a masei vaporilor obținuți în urma evaporării. Dacă tot lichidul se transformă în vapori, atunci ei devin nesaturați și dependența presiunii de temperatură se descrie aproximativ cu legea lui Charles (porțiunea BC din fig. 3.20).

În concluzie,

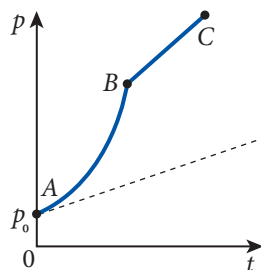


Fig. 3.20

legile gazului ideal nu pot fi aplicate în cazul vaporilor saturați, deoarece masa lor este variabilă.

Întrucît ecuația Clapeyron–Mendeleev descrie starea unui gaz, ea poate fi aplicată la descrierea stării vaporilor dacă se consideră masa lor o mărime variabilă.

b. Umiditatea aerului. Măsurarea umidității

Un caz aparte al studiului vaporilor îl constituie vaporii de apă din atmosfera Pămîntului. Este cunoscut că 2/3 din întreaga suprafață a globului pămîntesc este ocupată de ape. Deoarece evaporarea are loc la orice temperatură, în straturile inferioare ale atmosferei terestre întotdeauna există vapori de apă.

Mărima ce caracterizează cantitatea vaporilor de apă în atmosfera Pămîntului se numește umiditate a aerului.

Gradul de umiditate a aerului are o importanță deosebită atît pentru flora și fauna Pămîntului, cît și pentru multe procese care au loc în natură. Astfel, este evidentă necesitatea măsurărilor privind umiditatea aerului în diferite domenii ale tehnicii.

Pentru descrierea cantitativă a umidității aerului se introduc noțiunile de **umiditate absolută** și **umiditate relativă**.

Mărima egală cu densitatea vaporilor de apă ρ_a conținuți în atmosferă se numește umiditate absolută.

La aceleași condiții, valoarea numerică a densității vaporilor de apă exprimată în g/m^3 este aproximativ egală cu cea a presiunii lor parțiale măsurată în mm Hg.

De aceea în meteorologie umiditatea absolută se determină, de obicei, nu prin densitatea vaporilor, ci prin presiunea lor.

Gradul de umiditate a aerului depinde de temperatură. Una și aceeași densitate a vaporilor de apă în atmosferă într-o zi răcoasă de primăvară poate fi aproape de saturație și aerul este umed, iar într-o zi călduroasă de vară – departe de saturație și aerul este uscat. Așadar, este important să se cunoască cât de aproape se află vaporii de starea de saturație.

Umiditatea relativă reprezintă o mărime exprimată, de regulă, în procente și egală numeric cu raportul dintre densitatea vaporilor ρ_a aflați în atmosferă la temperatura dată și densitatea vaporilor saturați ρ_s la aceeași temperatură:

$$\varphi = \frac{\rho_a}{\rho_s} \cdot 100\%. \quad (3.20)$$

Dacă folosim legătura dintre densitate și presiune exprimată prin relația (1.31), atunci umiditatea relativă se poate exprima și prin presiuni:

$$\varphi = \frac{p_a}{p_s} \cdot 100\%, \quad (3.21)$$

unde p_a este presiunea vaporilor de apă din atmosferă la temperatura dată, iar p_s – presiunea vaporilor saturați la aceeași temperatură.

t° (C)	p (kPa)	ρ (10^{-3} kg / m ³)	t° (C)	p (kPa)	ρ (10^{-3} kg / m ³)	t° (C)	p (kPa)	ρ (10^{-3} kg / m ³)
-5	0,401	3,24	7	1,000	7,8	19	2,199	16,3
-4	0,437	3,51	8	1,066	8,2	20	2,333	17,3
-3	0,476	3,81	9	1,146	8,8	21	2,493	18,3
-2	0,517	4,13	10	1,226	9,4	22	2,639	19,4
-1	0,563	4,47	11	1,306	10,0	23	2,813	20,6
0	0,613	4,80	12	1,399	10,7	24	2,986	21,8
1	0,653	5,20	13	1,492	11,4	25	3,173	23,0
2	0,706	5,60	14	1,599	12,0	26	3,359	24,4
3	0,760	6,00	15	1,706	12,8	27	3,559	25,8
4	0,813	6,40	16	1,813	13,7	28	3,786	27,2
5	0,880	6,80	17	1,933	14,5	29	3,999	28,7
6	0,933	7,30	18	2,066	15,4	30	4,239	30,3

Pentru calculul umidității relative se folosesc valorile densității și presiunii vaporilor saturați la temperatura dată.

Să analizăm cum influențează variația temperaturii asupra umidității aerului. Admitem că, într-o zi cu temperatura $t_1 = 24^\circ\text{C}$, umiditatea absolută a aerului ρ_a este egală cu $0,012 \text{ kg/m}^3$. Densitatea vaporilor saturați la această temperatură este $\rho_{s1} = 0,0218 \text{ kg/m}^3$ (valoare luată din tabelul de mai sus) și din (3.20) rezultă că umiditatea relativă constituie aproximativ 55%. Presupunem că noaptea temperatura aerului se micșorează pînă la $t_2 = 14^\circ\text{C}$, iar densitatea (presiunea) vaporilor rămîne constantă. Atunci umiditatea relativă devine egală cu 100%, deoarece la această temperatură vaporii sînt saturați: $\rho_a = \rho_{s2} = 0,012 \text{ kg/m}^3$. Dacă spre dimineață temperatura aerului va coborî pînă la $t_3 = 8^\circ\text{C}$ ($\rho_{s3} = 0,0082 \text{ kg/m}^3$), atunci o parte din vaporii de apă

se vor condensa formînd rouă. În acest caz, din fiecare metru cub de aer se vor condensa $(\rho_{s1} - \rho_{s3}) \cdot 1\text{m}^3 = 0,0136\text{ kg}$ de vapori.

Temperatura la care în procesul răcirii aerului la presiune constantă vaporii de apă devin saturați se numește punct de rouă.

În exemplul cercetat mai sus temperatura $t_r = t_2 = 14^\circ\text{C}$ reprezintă punctul de rouă. Dacă se cunoaște punctul de rouă t_r , atunci umiditatea absolută a aerului este egală cu densitatea vaporilor saturați pentru această temperatură.

Majoritatea dispozitivelor folosite pentru măsurarea umidității aerului se numesc **higrometre** și se deosebesc după principiul de funcționare și construcție.

Higrometrul de condensare se bazează pe măsurarea punctului de rouă. El constă dintr-o cutie metalică C închisă cu o placă poleită N și prevăzută cu două orificii (fig. 3.21). Prin unul din ele se toarnă eter, după care se introduce termometrul T , iar prin al doilea se pompează aer cu ajutorul unei pere P . Curentul de aer ajunge în cutia cu eter care intensifică procesul de evaporare, iar temperatura cutiei se micșorează. Cînd vaporii de apă din atmosferă devin saturați, începe condensarea lor pe suprafața plăcii N , aceasta aburindu-se. Pentru a ușura observarea aburirii, placa N este înconjurată cu un inel lucios I . La acest moment se citește temperatura de pe termometrul T , care reprezintă punctul de rouă t_r , și cu ajutorul tabelelor se determină umiditatea absolută.

Pentru determinarea mai rapidă a umidității se folosește, de obicei, **psihrometrul** (fig. 3.22), care este compus din două termometre identice. Rezervorul cu mercur al unuia din ele este introdus într-o pungă cu vată îmbibată cu apă. Deoarece apa se evaporă, temperatura indicată de acest termometru este mai joasă decît cea indicată de primul. Întrucît evaporarea se manifestă mai intens cînd aerul este uscat, diferența dintre indicații va fi cu atît mai mare, cu cît umiditatea va fi mai mică. Cu ajutorul unui tabel special, numit **tabel psihometric** (vezi p. 116), cu care este prevăzut fiecare psihometru, se determină umiditatea relativă a aerului.

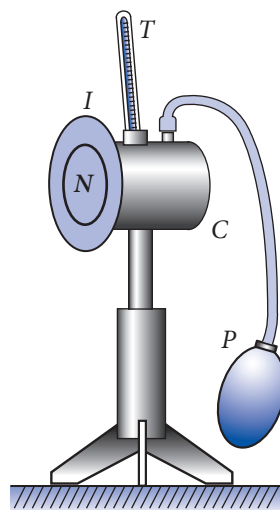


Fig. 3.21

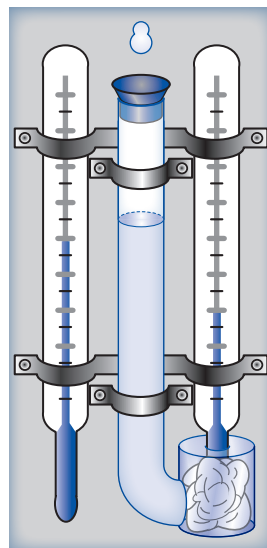


Fig. 3.22

c. Fierberea. Temperatura de fierbere

Paralel cu evaporarea, care poate avea loc la orice temperatură, însă numai la suprafața liberă a lichidului, mai există încă o formă de vaporizare, cînd vaporii se formează în tot volumul lichidului, dar numai la o temperatură anumită.

Vaporizarea care se realizează în toată masa lichidului se numește fierbere.

Indicațiile termo- metrului uscat, °C	Diferența indicațiilor termometrelor uscat și umed, °C										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Umiditatea relativă, %										
0	100	82	63	45	28	11					
1	100	83	65	48	32	16					
2	100	84	68	51	35	20					
3	100	84	69	54	39	24	10				
4	100	85	70	56	42	28	14				
5	100	86	72	58	45	32	19	6			
6	100	86	73	60	47	35	23	10			
7	100	87	74	61	49	37	26	14			
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7		
9	100	88	76	64	53	42	31	21	11		
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4	
11	100	88	77	66	56	46	36	26	17	8	
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17	9
15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	20
19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33
26	100	92	85	78	71	64	58	51	45	40	34
27	100	92	85	78	71	65	59	52	47	41	36
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
29	100	93	86	79	72	66	60	54	49	43	38
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

Experimental s-a constatat că fierberea (în condițiile date) începe întotdeauna la aceeași temperatură, numită **temperatură de fierbere**, care rămîne constantă pe toată durata transformării lichidului în vapori.

Să urmărim procesul fierberii unui lichid (de exemplu, a apei), menționînd mai întîi că în natură nu există lichide absolut omogene. În orice lichid există bule de aer sau alte gaze dizolvate în el, bulele fiind atît de mici încît nu se observă cu ochiul liber. În afară de aceasta, mai există bule mici de aer și pe pereții vasului în care se află lichidul, reținute aici de forțele de adeziune solid–gaz. La suprafața fiecărei astfel de bule au loc continuu procesele de evaporare a lichidului și de condensare a vaporilor, astfel încît în interiorul ei la orice temperatură se stabilește starea de echilibru dinamic și vaporii lichidului sînt saturați.

La o temperatură nu prea mare, presiunea din interiorul unei bule, conform legii lui Dalton, este egală cu suma presiunilor parțiale ale aerului p_a și vaporilor saturați p_s din ea. Din exterior asupra bulei acționează presiunea exterioară a atmosferei p_e și presiunea hidrostatică p_h . Este evident că în starea de echilibru mecanic presiunile din interiorul și exteriorul bulei trebuie să fie aproximativ egale:

$$p_s + p_a \approx p_e + p_{he}. \quad (3.22)$$

Prin încălzirea lichidului, presiunea vaporilor saturați din interiorul bulelor crește. În consecință, volumul lor se mărește, iar presiunea aerului din ele se micșorează. Cînd dimensiunile bulelor sînt suficient de mari, forța Arhimede depășește forța de adeziune solid–gaz și ele se desprind de pereții și fundul vasului, ridicîndu-se spre suprafața lichidului. În locul lor însă rămîn niște centre de vaporizare, unde se acumulează o nouă cantitate de vapori ai lichidului. Deoarece încălzirea nu este uniformă, straturile superioare ale lichidului sînt mai reci. Vaporii din interiorul bulelor ajunse aici se condensează, iar aerul din ele se dizolvă în lichid și volumul lor se micșorează. Astfel, forța Arhimede devine tot mai mică și bulele nu mai ajung pînă la suprafața lichidului (fig. 3.23, a). Această etapă de ascensiune a bulelor este însoțită de un zgomot caracteristic, care se aude întotdeauna înainte de începutul fierberii.

Cînd temperatura lichidului devine uniformă, volumul bulelor nu se mai micșorează, ci se mărește. Într-adevăr, cînd temperatura lichidului este constantă, presiunea vaporilor saturați din interiorul bulelor în ascensiune rămîne și ea constantă. În acest caz presiunea hidrostatică p_h se micșorează și, deoarece presiunea din interiorul bulelor este mai mare decît cea din exteriorul lor, din (3.22) rezultă că dimensiunile bulelor se măresc.

Ajungînd la suprafața lichidului, bulele se sparg și aruncă în aer vaporii saturați pe care îi conțin (fig. 3.23, b). Din acest moment începe fierberea. Deoarece la suprafața

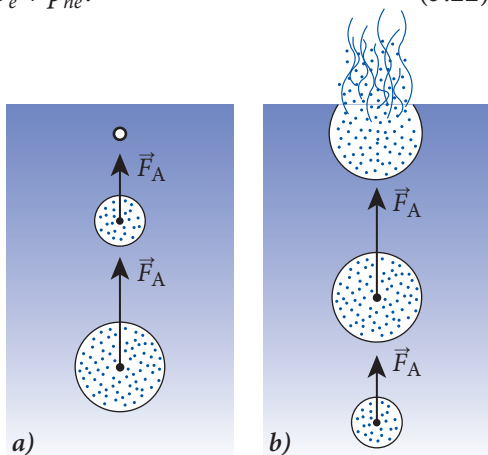


Fig. 3.23

lichidului $p_h = \rho gh = 0$, iar presiunea aerului din bule p_a devine neglijabilă, din (3.22) rezultă condiția de fierbere:

$$p_s \geq p_e. \quad (3.23)$$

Așadar,

fierberea unui lichid are loc la o temperatură constantă când presiunea vaporilor saturați ai lichidului este egală sau mai mare decât presiunea exterioară.

Temperatura la care presiunea vaporilor saturați este egală cu presiunea exterioară exercitată pe suprafața lichidului se numește **temperatură de fierbere**.

Întrucât presiunea vaporilor saturați p_s este în funcție de temperatură, din (3.23) rezultă că temperatura de fierbere depinde de presiunea exterioară exercitată asupra lichidului. La mărirea presiunii exterioare temperatura de fierbere crește. În figura 3.24 este reprezentată dependența presiunii vaporilor saturați de temperatură în cazul apei. Punctele ce se află pe curba OF reprezintă starea de echilibru dinamic dintre apă și vaporii

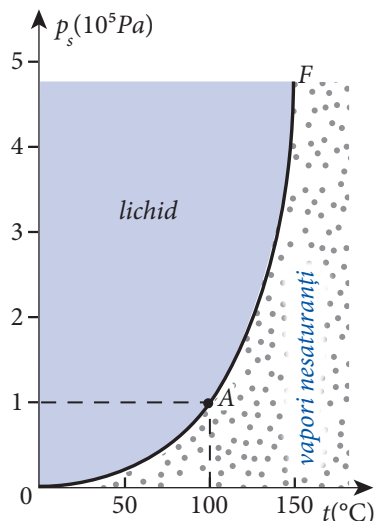


Fig. 3.24

săi, iar coordonatele lor – temperatura de fierbere și presiunea corespunzătoare acestor temperaturi. Orice punct situat în partea stângă de curba OF descrie starea lichidă a apei, iar în partea dreaptă – starea ei gazoasă (vapori nesaturați). Astfel apa, ca oricare alt lichid, poate fierbe la orice temperatură, dacă este satisfăcută concomitent și condiția (3.23). Când fierberea are loc la presiune atmosferică normală, temperatura corespunzătoare este numită **temperatură normală de fierbere**, care pentru apă (punctul A, fig. 3.24) este egală cu 100°C. Pentru presiuni mai mari decât cea atmosferică $p_e > p_0$, temperatura de fierbere crește, iar pentru $p_e < p_0$, ea se micșorează.

Fierberea lichidelor la presiuni joase sau ridicate, adică la temperaturi mai mici ori mai mari decât temperatura normală de fierbere, este folosită pe larg în industria chimică și alimentară, în medicină ș.a.m.d. De exemplu, distilarea unor lichide care se descompun la temperatura normală de fierbere se realizează la presiuni joase, iar instrumentele medicale sînt sterilizate cu ajutorul fierberii la o temperatură de 120°C ($p_e = 2 \cdot 10^5$ Pa), la care majoritatea microbilor nu mai rezistă.

S-a menționat mai sus că moleculele care părăsesc lichidul prin vaporizare (evaporare sau fierbere) duc cu ele o parte din energia lichidului, ceea ce are ca efect scăderea temperaturii lui. Rezultă că pentru a menține constantă temperatura lichidului care fierbe, este nevoie să-i transmitem o cantitate de căldură exact egală cu aceea care se consumă în procesul vaporizării. De exemplu, un lichid fierbe numai dacă continuă să primească căldură, deși temperatura lui rămîne constantă. În această situație căldura primită se consumă numai pentru vaporizare.

Raportul dintre cantitatea de căldură Q necesară pentru vaporizarea lichidului și masa m a acestuia la temperatură constantă se numește **căldură specifică (latentă) de vaporizare**:

$$\lambda_v = \frac{Q}{m}. \quad (3.24)$$

Ea depinde de natura lichidului și în SI are unitatea J/kg.

Așadar, pentru a transforma o masă m de lichid în vapori, trebuie să-i transmitem o cantitate de căldură

$$Q_v = \lambda_v m. \quad (3.25)$$

Cantitatea de căldură ce se degajă la condensarea aceleiași mase de vapori este numeric egală cu cantitatea de căldură consumată pentru vaporizare

$$Q_c = \lambda_c m, \quad (3.26)$$

unde λ_c este căldura specifică de condensare. Egalitatea numerică a cantităților de căldură Q_v și Q_c este o manifestare a legii conservării energiei la schimbarea stării de agregare a substanței. Din (3.25) și (3.26) rezultă egalitatea căldurilor specifice de vaporizare și condensare $\lambda_c = \lambda_v$, de aceea în tabele sînt date numai valorile pentru λ_v .

Problemă rezolvată

1

Se dă:

$$t_1 = 25^\circ\text{C},$$

$$t_2 = 13^\circ\text{C},$$

$$t_3 = 20^\circ\text{C},$$

$$\rho_{s1} = 0,023 \text{ kg/m}^3,$$

$$\rho_{s2} = 0,0114 \text{ kg/m}^3,$$

$$\rho_{s3} = 0,0173 \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta\varphi - ?$$

Determinați umiditatea absolută și umiditatea relativă ale aerului dintr-o încăpere cu temperatura $t_1 = 25^\circ\text{C}$, dacă punctul de rouă este $t_2 = 13^\circ\text{C}$. Cum se modifică umiditatea relativă dacă aerul se răcește pînă la $t_3 = 20^\circ\text{C}$, iar umiditatea absolută rămîne constantă? Densitățile vaporilor saturați ai apei la temperaturile t_1 , t_2 și t_3 sînt corespunzător egale cu $\rho_{s1} = 0,023 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{s2} = 0,0114 \text{ kg/m}^3$ și $\rho_{s3} = 0,0173 \text{ kg/m}^3$.

Rezolvare

Din definiția punctului de rouă rezultă că umiditatea absolută ρ_1 la temperatura t_1 este egală cu densitatea vaporilor saturați la temperatura care este punctul de rouă. Așadar,

$$\rho_1 = \rho_{s2} = 0,0114 \text{ kg/m}^3.$$

Din (3.20) rezultă că umiditatea relativă la această temperatură este

$$\varphi_1 = \frac{\rho_1}{\rho_{s1}} \cdot 100\%; \quad \varphi_1 \approx 49,6\%,$$

iar la temperatura t_3

$$\varphi_3 = \frac{\rho_1}{\rho_{s3}} \cdot 100\%; \quad \varphi_3 \approx 65,9\%.$$

Deoarece umiditatea absolută rămîne constantă, rezultă că $\rho_3 = \rho_1$ și umiditatea relativă se micșorează cu valoarea

$$\Delta\varphi = \varphi_3 - \varphi_1 = \frac{\rho_1}{\rho_{s3}} \cdot 100\% - \varphi_1; \quad \Delta\varphi \approx 16,3\%.$$

Se dă:

$m = 1 \text{ kg}$,
 $V = 1 \text{ L}$,
 $T = 373 \text{ K}$,
 $p = 10^5 \text{ Pa}$,
 $\lambda_v = 2,26 \text{ MJ/kg}$
 $v = ?$

SI:

10^{-3} m^3 ,
 $2,26 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$
 m/s

Ce viteză s-ar putea imprima unui corp cu masa de 1 kg, dacă în acest scop ar fi posibilă utilizarea întregii energii degajate la condensarea unui litru de vapori de apă aflați la presiunea atmosferică normală și temperatura de 373 K?

Rezolvare

La condensarea vaporilor de apă se degajă cantitatea de căldură $Q = m_v \lambda_v$, unde m_v reprezintă masa vaporilor de apă, iar λ_v este căldura latentă de vaporizare (condensare) a apei, care se ia din tabele. Masa vaporilor de apă se exprimă prin volumul și densitatea lor (1.31)

$$m_v = \rho V = \frac{PM}{RT} V,$$

unde $M = 18 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$ reprezintă masa molară a vaporilor de apă, iar $R = 8,31 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ este constanta universală a gazelor.

Întrucât întreaga cantitate de căldură degajată la condensare este utilizată pentru imprimarea vitezei, conform legii conservării energiei $Q = E_c$ sau

$$\frac{PM}{RT} V \lambda_v = \frac{mv^2}{2},$$

de unde

$$v = \sqrt{\frac{2pVM\lambda_v}{mRT}}; v \approx 51 \text{ m/s} \approx 184 \frac{\text{km}}{\text{h}}.$$

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Ce reprezintă vaporizarea și sub ce forme se realizează?
2. Explicați mecanismul cinetico-molecular al evaporării.
3. Ce reprezintă echilibrul dinamic între lichid și vapori?
4. Care vapori se numesc saturanți? Care sînt proprietățile lor?
5. Prin ce se deosebesc vaporii nesaturanți de cei saturanți?
6. Ce reprezintă umiditatea aerului? Definiți umiditatea absolută și umiditatea relativă.
7. Ce se numește punct de rouă?
8. Descrieți principiul de funcționare a higrometrului de condensare și a psihrometrului.
9. Ce reprezintă fierberea și cum se explică mecanismul ei cinetico-molecular?
10. Definiți temperatura de fierbere. Cum depinde ea de presiunea exterioară?
11. Definiți căldura specifică de vaporizare.
12. Determinați umiditatea absolută a aerului cu temperatura de 20°C și umiditatea relativă de 60%, dacă densitatea vaporilor saturanți la această temperatură este de $0,0173 \text{ kg/m}^3$.
13. Determinați umiditatea relativă a aerului cu temperatura de 30°C , dacă punctul de rouă este de 15°C . Densitățile vaporilor saturanți la cele două temperaturi sînt $\rho_{s1} = 0,0304 \text{ kg/m}^3$ și $\rho_{s2} = 0,0128 \text{ kg/m}^3$.

14. Umiditatea relativă a aerului dintr-o odaie cu temperatura de 20°C este de 60%. Cu câte grade trebuie să se micșoreze temperatura aerului de afară pentru ca geamurile să se aburească?
15. Determinați cantitatea vaporilor de apă la temperatura de 100°C necesari pentru a încălzi 50 kg de apă de la temperatura de 7°C până la cea de 77°C . (Se cunosc căldura specifică și cea latentă de vaporizare a apei: $c = 4,2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ și $\lambda_v = 2,26 \text{ MJ}/\text{kg}$.)
16. Calculați variația energiei interne a apei cu masa de 1 kg și temperatura de 0°C la transformarea ei în vapori cu temperatura de 100°C . (Se cunosc căldura specifică și cea latentă de vaporizare a apei: $c = 4,2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ și $\lambda_v = 2,26 \text{ MJ}/\text{kg}$.)

3.7* TOPIREA ȘI SOLIDIFICAREA. SUBLIMAREA ȘI DESUBLIMAREA

Procesul trecerii substanței din stare solidă în stare lichidă se numește **topire**, iar transformarea inversă din starea lichidă în cea solidă este numită **solidificare** sau **cristalizare**.

Să urmărim procesul topirii unui corp solid din punct de vedere cinetico-molecular. Corpurile solide sînt caracterizate de ordinea la distanță în amplasarea moleculelor într-o rețea cristalină. Dacă corpului i se transmite o cantitate de căldură din exterior, atunci la început crește atît energia cinetică medie a moleculelor (temperatura), cît și cea potențială, deoarece se măresc vitezele lor și distanțele dintre ele. Cînd energia primită devine suficientă pentru învingerea forțelor de atracție moleculară, începe distrugerea rețelei cristaline și transformarea solidului în lichid, adică topirea. Din acest moment, toată căldura transmisă este consumată pentru efectuarea lucrului mecanic necesar la distrugerea completă a rețelei cristaline și temperatura substanței rămîne constantă. Această temperatură este numită **temperatură de topire** T_0 (fig. 3.25, a). După încheierea procesului de topire, căldura transmisă se consumă pentru creșterea vitezei moleculelor substanței deja în stare lichidă și, în consecință, crește temperatura acesteia.

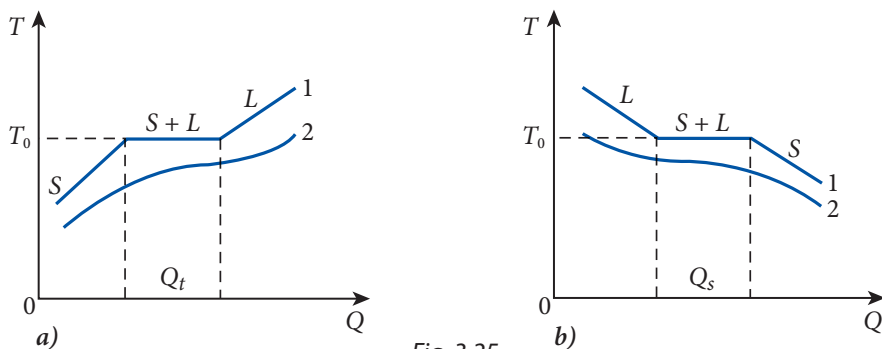


Fig. 3.25

În mod analog se explică și mersul procesului invers, de solidificare (fig. 3.25, b). La răcirea substanței în stare lichidă se degajă o cantitate oarecare de căldură în exterior, pînă cînd temperatura devine egală cu cea de topire T_0 , la care începe procesul de solidificare. La cedarea în continuare a căldurii de substanță, această temperatură

rămâne constantă pînă cînd forțele moleculare reconstruiesc complet rețeaua cristalină. După încheierea procesului de solidificare, temperatura solidului se micșorează prin eliminarea unei cantități de căldură în exterior.

După cum arată experimentul, corpurile amorfe nu posedă temperatură de topire (fig. 3.25, curba 2). La încălzire ele trec printr-o stare de înmuiere și, mărindu-și continuu temperatura, se transformă în lichid.

Raportul dintre cantitatea de căldură Q necesară pentru topirea substanței și masa m a acesteia luată la temperatura de topire se numește **căldură specifică (latentă) de topire**:

$$\lambda_t = \frac{Q_t}{m}. \quad (3.27)$$

Ea depinde de natura substanței și de presiunea externă. În SI are unitatea J/kg.

Deoarece cantitatea de căldură ce se degajă la solidificare este egală cu cea necesară pentru topire Q_t , rezultă că și căldura specifică de solidificare este egală cu cea de topire λ_t . Așadar, cantitatea de căldură absorbită (degajată) la topirea (solidificarea) unei mase m de substanță este

$$Q_t = \lambda_t \cdot m. \quad (3.28)$$

S-a constatat că temperatura de topire (ori solidificare) depinde de presiune. De exemplu, din cauza suprafeței de contact relativ mici a patinelor cu gheața, patinatorul creează o presiune considerabilă și gheața se topește la o temperatură mai mică de 0°C . Astfel, se formează un strat foarte subțire de apă, care favorizează alunecarea.

Dacă la topire substanța se dilată, atunci mărirea presiunii exterioare duce la creșterea temperaturii de topire (fig. 3.26, a), iar dacă se contractă – la micșorarea ei (fig. 3.26, b). De menționat însă că numai variații foarte mari ale presiunii pot modifica sensibil temperatura de topire. De exemplu, pentru a micșora temperatura de topire a gheții cu 1°C , este nevoie de o creștere a presiunii cu aproximativ $1,3 \cdot 10^7 \text{ Pa}$.

În natură există un șir de substanțe solide care posedă miros (de exemplu, naftalina, sulful, iodul ș.a.). Rezultă că în aer există vapori ai acestor substanțe, care s-au format direct din starea solidă.

Procesul trecerii substanței din stare solidă în stare gazoasă se numește sublimare, iar cel invers – desublimare.

Aceste procese se observă foarte ușor în cazul gheții. Iarna rufe scoase afară la ger se usucă prin sublimare, iar „dese-nele” apărute pe geamuri în zilele geroase se formează prin desublimarea vaporilor de apă din atmosferă.

Este evident că la sublimare corpul absoarbe o cantitate de căldură egală cu suma dintre cantitățile de căldură necesare pentru topirea și apoi vaporizarea lichidului obținut

$$Q_s = Q_t + Q_v = \lambda_s \cdot m, \quad (3.29)$$

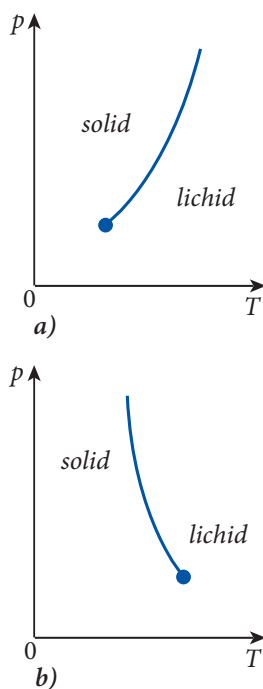


Fig. 3.26

unde λ_s este căldura specifică (latentă) de sublimare.

Din relațiile (3.25), (3.28) și (3.29) rezultă că

$$\lambda_s = \lambda_t + \lambda_v. \quad (3.30)$$

Deoarece desublimarea este procesul invers al sublimării, căldura degajată se calculează tot cu relația (3.30).

Presiunea vaporilor saturanți ce provin din corpul solid depinde de temperatură în același mod ca și cea a vaporilor saturanți proveniți din lichid (fig. 3.27). Această dependență însă are o pantă mult mai mică, deoarece la încălzirea cu un grad numărul de molecule care părăsesc solidul este mult mai mic decât numărul de molecule care părăsesc lichidul. În consecință, presiunea vaporilor saturanți proveniți din solid este mult mai mică decât a celor proveniți din lichid.

În funcție de condițiile exterioare, substanța poate exista în diferite stări de agregare sau faze. După cum arată experiența, o substanță oarecare luată la presiuni mici și temperaturi înalte se află în stare gazoasă, la presiuni mari și temperaturi joase – în stare solidă, iar valorile intermediare ale presiunii și temperaturii corespund stării ei lichide. Astfel, transformările de fază ale unei substanțe sînt determinate de variațiile temperaturii și presiunii, iar condiția de coexistență a fazelor se exprimă prin dependența dintre acești parametri.

Graficul presiunii în funcție de temperatură reprezintă o descriere foarte comodă și clară a transformărilor de fază ale substanței și este numit **diagramă de stare** sau **diagramă de echilibru al fazelor**. Asemenea diagrame au fost deja construite cînd s-au studiat transformările bifazice: lichid–gaz (fig. 3.24), solid–lichid (fig. 3.26) și solid–gaz (fig. 3.27). Dacă pentru o anumită substanță se îmbină toate diagramele transformărilor bifazice menționate mai sus, atunci se obține diagrama de stare a acestei substanțe.

În figura 3.28 sînt reprezentate calitativ diagramele caracteristice pentru substanțele care se dilată la topire (a) și pentru cele care se contractă la topire (b).

Curbele BT, CT și OT reprezintă liniile de echilibru al fazelor. Ele corespund condițiilor de coexistență (echilibru) a două faze ale substanței: curba BT – de coexistență a corpului solid și a lichidului, curba CT – a lichidului și a vaporilor săi, curba OT – a corpului solid și a vaporilor.

Orice punct de pe diagramă, cu excepția celor de pe curbele menționate, corespunde unei stări de echilibru stabil al substanței. Astfel, regiunea din stînga curbei OTB corespunde fazei solide, cea mărginită de curba BTC – fazei lichide, iar regiunea din dreapta curbei OTC – fazei gazoase.

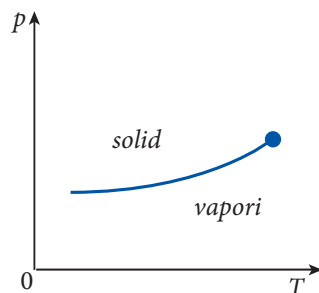
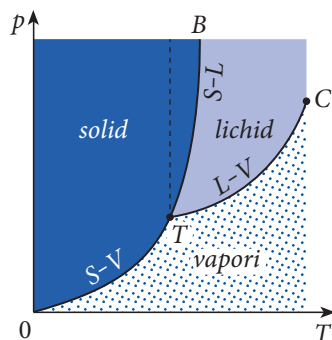
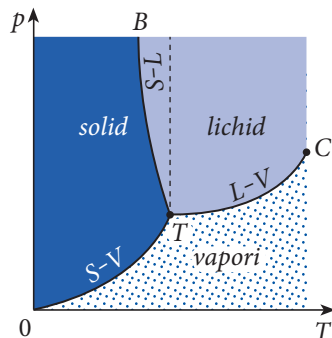


Fig. 3.27



a)



b)

Fig. 3.28

Toate diagramele de stare conțin două puncte caracteristice cu parametrii (p_c, T_c) și (p_t, T_t) unici pentru substanța dată. Punctul C corespunde stării critice a substanței, în care coexistă două faze: lichidă și gazoasă, iar punctul T , numit **punct triplu**, reprezintă o stare unică a substanței, numită **stare triplă**, în care coexistă toate cele trei faze: solidă, lichidă și gazoasă.

Menționăm că starea triplă a apei este folosită pentru definirea unității fundamentale a temperaturii în SI:

Kelvinul este fracțiunea $1/273,16$ din temperatura termodinamică a punctului triplu al apei.

Problemă rezolvată

Se dă:	SI:
$R = 5 \text{ cm},$	$5 \cdot 10^{-2} \text{ m},$
$h = 6 \text{ cm}$	$6 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
$t - ?$	K

O bilă de fier cu raza de 5 cm, încălzită prealabil pînă la o anumită temperatură, este așezată pe o bucată de gheață aflată la temperatura de topire. Ca rezultat, bila pătrunde complet în bucata de gheață, centrul ei fiind la adîncimea $h = 6 \text{ cm}$ (fig. 3.29). Neglijînd încălzirea apei formate la topirea gheții, determinați pînă la ce temperatură a fost încălzită bila.

Rezolvare

Deoarece încălzirea apei este neglijabilă, toată căldura cedată de bilă la răcirea ei se consumă pentru topirea gheții:

$$Q_1 = m_1 \lambda_t = \rho_1 V_1 \lambda_t,$$

unde $\rho_1 = 0,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ și $\lambda_t = 3,35 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$ reprezintă densitatea și căldura latentă de topire a gheții, iar m_1 și V_1 sînt masa și volumul gheții topite. Din figura 3.29 se observă că volumul gheții topite constă din volumul unui cilindru cu înălțimea h și al unei jumătăți de sferă cu raza R :

$$V_1 = \pi R^2 h + \frac{2}{3} \pi R^3 = \frac{1}{3} \pi R^2 (3h + 2R).$$

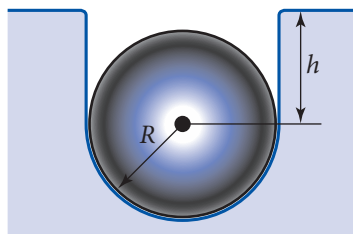


Fig. 3.29

Așadar, căldura consumată la topirea gheții este

$$Q_1 = \frac{1}{3} \pi R^2 (3h + 2R) \rho_1 \lambda_t.$$

Cantitatea de căldură cedată de bila încălzită

$$Q_2 = m_2 c (T - T_0) = \rho_2 V_2 c \Delta T = \frac{4}{3} \rho_2 \pi R^3 c \Delta T,$$

unde $\rho_2 = 7,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ și $c = 460 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ constituie densitatea și căldura specifică a fierului din care este confecționată bila, m_2 și V_2 sînt masa și volumul bilei, iar $\Delta T = T - T_0$ este variația temperaturii bilei de la temperatura la care a ajuns fiind încălzită pînă la cea de topire a gheții $T_0 = 273 \text{ K}$.

Conform legii conservării energiei, $Q_1 = Q_2$ sau

$$\frac{1}{3} \pi R^2 (3h + 2R) \rho_1 \lambda_t = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_2 c \Delta T,$$

de unde

$$\Delta T = \frac{(3h + 2R) \rho_1 \lambda_t}{4R \rho_2 c}; \Delta T \approx 116 \text{ K}.$$

Întrucît variația temperaturii pe scările Celsius și Kelvin este aceeași, $\Delta t = \Delta T$, iar temperatura inițială a gheții era de 0°C , rezultă că bila a fost încălzită pînă la $t = 116^{\circ}\text{C}$.

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Ce reprezintă topirea și solidificarea?
2. Explicați mecanismul cinetico-molecular al topirii.
3. Ce se numește căldură specifică de topire (solidificare)?
4. Ce reprezintă temperatura de topire și cum depinde ea de presiune?
5. Ce reprezintă procesele de sublimare și desublimare?
6. Cum se determină căldura specifică de sublimare (desublimare)?
7. Ce reprezintă diagrama de stare a unei substanțe?
8. Ce reprezintă punctul triplu al substanței?
9. Un cubușor de gheață la temperatura de topire cu masa de 20 g este lovit de un glonț cu masa de 9 g, ce zboară cu o anumită viteză. Determinați viteza glonțului, dacă se știe că o treime din energia lui s-a consumat pentru fărîmîțarea gheții, iar restul pentru topirea ei. Căldura latentă de topire a gheții $\lambda_t = 335 \text{ kJ/kg}$.
10. Un glonț de plumb zboară cu viteza de 450 m/s și, lovind perpendicular un perete, se topește complet. Care a fost temperatura glonțului înainte de lovitură, dacă pentru încălzire și topire se consumă doar jumătate din energia lui mecanică? Căldura latentă de topire, cea specifică și temperatura de topire ale plumbului sînt $\lambda_t = 25 \text{ kJ/kg}$, $c = 130 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ și, respectiv, $T_t = 600 \text{ K}$.

3.8* CALORIMETRIA. ECUAȚIA CALORIMETRICĂ

O consecință a principiului întâi al termodinamicii este ecuația calorimetrică, care stă la baza **calorimetriei**.

Calorimetria este o ramură a fizicii experimentale, în care se determină cantitățile de căldură ce însoțesc diferite procese și caracteristicile termice respective.

De exemplu, se determină căldura specifică (caracterizează procesul încălzire-răcire), căldurile latente – de topire, de vaporizare (caracterizează transformările de fază), căldurile ce însoțesc reacțiile chimice (de exemplu, puterea calorică a combustibilului) etc.

În procedeul de efectuare a măsurătorilor, este important să fie evitat schimbul necontrolat de căldură între sistemul de corpuri cercetat și mediul exterior, adică este necesară o izolare adiabatică a acestuia. În acest scop, sistemul de corpuri este introdus în **calorimetru**, aparat care asigură condițiile menționate.

Construcția celui mai simplu calorimetru vă este cunoscută din gimnaziu. El este constituit din două vase (fig. 3.30) – vasul interior (1) și vasul exterior (2), vasul interior fiind așezat pe suporturi termoizolatoare (3) (din plută, lemn sau anumite mase plastice). Capacul vasului (4) este confecționat, de asemenea, din material termoizolant,

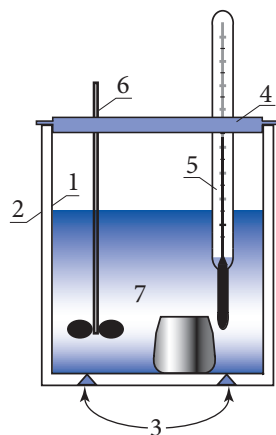


Fig. 3.30

avînd un orificiu pentru fixarea termometrului (5) și un al doilea orificiu prin care trece tija agitatorului (6). Vasul interior se umple parțial cu un lichid (7), de obicei, cu apă, pentru a înlesni schimbul de căldură între corpurile din calorimetru. Rotirea agitatorului, însoțită de deplasarea lui în sus și în jos, asigură o uniformizare mai rapidă a temperaturii în interiorul calorimetrului.

Aerul din spațiul dintre vasele calorimetrului, avînd conductibilitate termică mică, asigură un schimb redus de căldură. Schimbul de căldură ar fi și mai redus dacă aerul dintre vase ar fi complet evacuat. Această metodă a fost propusă și realizată de fizicianul britanic James Dewar (1842–1923), care a obținut pentru prima dată hidrogen lichid.

Dewar a construit un recipient cu pereți dubli de sticlă, avînd fețele interioare argintate, aerul dintre pereți fiind evacuat (fig. 3.31). În așa caz, se spune că spațiul este vidat sau că acolo există vid. Acest recipient se numește *vas Dewar*. Calorimetrul cu vas Dewar este performant în comparație cu calorimetrele obișnuite.

De menționat că vasul Dewar constituie partea principală a termosului.

Să urmărim procesele ce au loc în calorimetru după ce în el sînt introduse corpuri de diferite temperaturi. În urma schimbului de căldură dintre ele, sistemul de corpuri trece cu timpul în stare de echilibru termic și temperatura devine aceeași în toate punctele lui, fiind numită temperatură a amestecului (se notează cu θ).

Această afirmație se află la baza calorimetriei, ca și ecuația calorimetrică, obținută din principiul întâi al termodinamicii.

Din descrierea de mai sus a calorimetrului este clar că nici sistemul de corpuri din el, nici fiecare corp în parte nu efectuează lucrul mecanic, iar sistemul de corpuri nu face schimb de căldură cu mediul exterior. În această situație ($L_{\text{sist.}} = 0$ și $Q_{\text{sist.}} = 0$), variația energiei interne a sistemului este nulă: $\Delta U_{\text{sist.}} = 0$. Însă energia internă a sistemului se compune din energiile interne ale corpurilor din componența lui: $U_{\text{sist.}} = U_1 + U_2 + \dots + U_n$. Prin urmare, suma variațiilor energiilor interne ale corpurilor din calorimetru este nulă:

$$\Delta U_1 + \Delta U_2 + \dots + \Delta U_n = 0. \quad (3.31)$$

După cum s-a menționat, lucrurile efectuate de fiecare corp în parte sînt egale cu zero, astfel din principiul întâi rezultă $Q_1 = \Delta U_1$, $Q_2 = \Delta U_2$, ... $Q_n = \Delta U_n$, iar ecuația (3.31) ia forma:

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = 0. \quad (3.32)$$

Aceasta este ecuația calorimetrică:

suma algebrică a cantităților de căldură cu care fac schimb corpurile din sistemul izolat este egală cu zero.

Ecuația calorimetrică poate fi scrisă și sub o altă formă, mai frecvent folosită la calcule. Notăm suma tuturor termenilor pozitivi din (3.32), adică suma tuturor

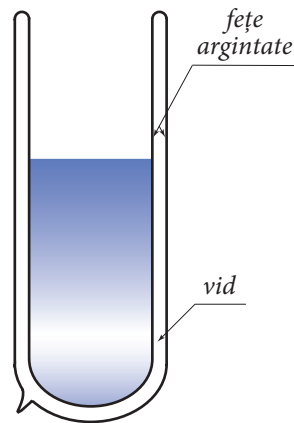


Fig. 3.31

căldurilor primite, cu $Q_{\text{prim.}}$, iar suma tuturor termenilor negativi, adică a căldurilor cedate, cu $Q_{\text{ced.}}$. Obținem:

$$Q_{\text{prim.}} + Q_{\text{ced.}} = 0, \quad (3.33)$$

unde $Q_{\text{prim.}} > 0$ și $Q_{\text{ced.}} < 0$, prin urmare

$$Q_{\text{prim.}} = |Q_{\text{ced.}}|. \quad (3.34)$$

Suma tuturor cantităților de căldură primite de unele corpuri din calorimetru este egală cu valoarea absolută a sumei cantităților de căldură cedate de celelalte corpuri din calorimetru.

Să aplicăm metoda calorimetrică la determinarea căldurii specifice a unui corp solid. Notăm cu m_1 masa lichidului din calorimetru, cel mai frecvent apa, și cu c_1 căldura specifică a lichidului, cu m_c , m_a și m_t – masele vasului interior al calorimetrului, agitatorului și termometrului, cu c_c , c_a și c_t – căldurile specifice respective. Toate aceste corpuri se află la temperatura t_1 indicată de termometru. În calorimetru se introduce un corp de masă m_2 din substanța a cărei căldură specifică c_x se cere determinată. Temperatura t_2 a corpului este cunoscută. Admitem că $t_2 > t_1$. Corpul se introduce în calorimetru și după un timp în acesta se stabilește o temperatură comună de echilibru θ .

Lichidul, vasul interior, agitatorul și termometrul își măresc temperatura de la t_1 la θ pe seama căldurii primite: $Q_{\text{prim.}} = (m_1 c_1 + m_c c_c + m_a c_a + m_t c_t)(\theta - t_1)$.

Observăm că mărimea

$$C = m_c c_c + m_a c_a + m_t c_t \quad (3.35)$$

este constantă pentru calorimetrul dat, independentă de lichidele sau corpurile ce se introduc în el și de temperaturile acestora. Evident, mărimea C este capacitatea termică (calorică) a calorimetrului.

Pentru cantitatea de căldură primită avem:

$$Q_{\text{prim.}} = (m_1 c_1 + C)(\theta - t_1). \quad (3.36)$$

Corpul introdus în calorimetru își modifică temperatura de la t_2 la θ și cedează cantitatea de căldură

$$Q_{\text{ced.}} = m_2 c_x (\theta - t_2). \quad (3.37)$$

Substituind aceste două expresii în ecuația calorimetrică (3.33), obținem:

$$(m_1 c_1 + C)(\theta - t_1) + m_2 c_x (\theta - t_2) = 0,$$

de unde exprimăm căldura specifică necunoscută

$$c_x = \frac{(m_1 c_1 + C)(\theta - t_1)}{m_2 (t_2 - \theta)}. \quad (3.38)$$

La același rezultat se ajunge dacă se substituie $|Q_{\text{ced.}}| = m_2 c_x (t_2 - \theta)$ în ecuația (3.34).

În cazul determinării căldurilor latente, trebuie să se țină seama de faptul că la topire corpul primește cantitatea de căldură $Q_t = m \lambda_t$, unde λ_t este căldura latentă de topire, iar la solidificare această cantitate de căldură este cedată, adică trebuie luată cu semnul minus. O situație similară are loc la vaporizare, când lichidul primește cantitatea de căldură $Q_v = m \lambda_v$, unde λ_v este căldura latentă de vaporizare, iar la condensare această căldură este cedată.

Considerăm experimentul în care se determină căldura latentă de vaporizare a apei. În acest scop, în calorimetrul ce conține o masă m_1 de apă (căldura specifică c_1 și temperatura t_1) se introduc vapori la temperatura de fierbere a apei $t_f = 100^\circ\text{C}$ la presiune atmosferică normală. După un timp, accesul vaporilor în calorimetru este întrerupt și se înscrie temperatura θ indicată de termometru. Masa m_2 a vaporilor de apă se determină prin cântărirea vasului interior al calorimetrului înainte și după introducerea vaporilor în el.

Folosind aceleași notații ale parametrilor stării inițiale a calorimetrului ca și în cazul experimentului precedent, căldura primită este dată de formula (3.36). Această căldură este cedată la condensarea masei m_2 de vapori luați la temperatura de fierbere t_f , apoi la răcirea apei obținute din ei pînă la temperatura amestecului θ . Prin urmare,

$$Q_{\text{ced.}} = m_2\lambda_v + m_2c_1(\theta - t_f),$$

a cărei valoare absolută

$$|Q_{\text{ced.}}| = m_2\lambda_v + m_2c_1(t_f - \theta). \quad (3.39)$$

Substituind (3.36) și (3.39) în ecuația calorimetrică (3.34), obținem:

$$(m_1c_1 + C)(\theta - t_1) = m_2\lambda_v + m_2c_1(t_f - \theta),$$

de unde exprimăm mărimea căutată

$$\lambda_v = \frac{1}{m_2} (m_1c_1 + C)(\theta - t_1) - c_1(t_f - \theta). \quad (3.40)$$

Cunoașterea caracteristicilor termice ale substanței este foarte importantă. De exemplu, elaborarea tehnologiei de obținere pe cale artificială a diamantului a fost posibilă numai utilizînd datele privind proprietățile termice ale carbonului.

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Ce condiție importantă trebuie să asigure calorimetrul pentru corpurile din el?
2. În care calorimetru – cu agitator sau fără el – echilibrul termic se stabilește mai repede?
3. Cum influențează durata intervalului de timp în care se stabilește echilibrul termic asupra preciziei măsurătorilor calorimetrice? Argumentați răspunsul.
4. Într-un calorimetru de capacitate calorică neglijabilă se află $m_1 = 0,8$ kg de apă la temperatura $t_1 = 80^\circ\text{C}$. După ce în calorimetru s-au adăugat $m_2 = 0,6$ kg de apă rece, temperatura în calorimetru a devenit $\theta = 56^\circ\text{C}$. Care a fost temperatura apei reci?
5. Pentru a determina căldura specifică a substanței din care este confecționat vasul interior al unui calorimetru, s-a realizat experimentul următor: s-a determinat masa vasului interior $m_c = 0,2$ kg; în el s-a turnat o masă $m_1 = 0,1$ kg de apă și s-a măsurat temperatura în calorimetru $t_1 = 18^\circ\text{C}$; apoi în calorimetru s-a mai adăugat o masă $m_2 = 0,15$ kg de apă luată la temperatura $t_2 = 57^\circ\text{C}$ și s-a măsurat temperatura care s-a stabilit în calorimetru: $\theta = 38^\circ\text{C}$. Pe baza acestor date calculați căldura specifică căutată. Căldura specifică a apei $c_a = 4,2 \cdot 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.
6. Calculați căldura specifică a unui lichid pe baza datelor obținute în experimentul următor: masa vasului interior de alamă al calorimetrului $m_c = 0,15$ kg; masa lichidului din calorimetru $m_1 = 0,1$ kg; temperatura în calorimetru $t_1 = 18^\circ\text{C}$, după ce în calorimetru se introduce un corp din oțel de masă $m_2 = 0,3$ kg aflat la temperatura $t_2 = 70,6^\circ\text{C}$,

-

11

LICHIDE ȘI SOLIDE

129
$$m_2\lambda + m_2c(t_2 - t_0) = m_1c(t_1 - t_2) + m_1c_c(t_c - t_2), \quad (3.41)$$
$$m_2 \lambda + m_2 c (t_2 - t_0) = m_1 c (t_1 - t_2). \quad (3.42)$$
$$\lambda = c \left[\frac{m_1}{m_2} (t_1 - t_2) - t_2 \right].$$

1. Pregătiți bucățele de gheață la temperatura de 0°C. Pentru aceasta, gheața preparată din timp se sfărâmă și se lasă într-un vas oarecare pînă cînd bucățelele de gheață vor pluti în apa formată la topirea lor parțială (15÷20 min.).

- Măsurăți cu ajutorul termometrului temperatura din clasă, care coincide cu temperaturile inițială și finală ale experimentului t_2 .
- Turnați în paharul gradat $100 \div 150$ ml de apă luată la o temperatură cu $30 \div 40^\circ\text{C}$ mai mare decât cea din clasă. Folosind legătura dintre masă și volum, determinați masa apei calde $m_1 = \rho V_1$ folosită în experiment ($\rho = 1\,000\text{ kg/m}^3$ este densitatea apei).
- Măsurăți temperatura t_1 a apei calde de masă m_1 din paharul gradat și turnați-o în vasul interior al calorimetrului.
- Ștergeți o bucățică de gheață cu hîrtie de filtru și introduceți-o în vasul calorimetrului. Amestecînd cu un agitator, observați temperatura amestecului după topirea completă a bucățelei de gheață. Continuați să introduceți gheață pînă cînd temperatura de echilibru a amestecului va deveni egală cu cea din clasă t_2 .
- Turnați apa din calorimetru în paharul gradat și observați volumul ei V_2 . Determinați masa gheții topite după creșterea $\Delta V = V_2 - V_1$ a volumului de apă, adică $m_2 = \rho \Delta V$.
- Introduceți rezultatele măsurărilor și determinărilor în următorul tabel:

t_1 ($^\circ\text{C}$)	m_1 (kg)	t_2 ($^\circ\text{C}$)	ΔV (m^3)	m_2 (kg)	λ (kJ/kg)	c (kJ/kg · K)	λ_{tab} (kJ/kg)
						4,19	330

- Comparați valoarea căldurii specifice latente de topire a gheții λ obținută experimental cu cea cunoscută din tabele λ_{tab} . Determinați eroarea absolută $\Delta\lambda = |\lambda - \lambda_{\text{tab}}|$ și cea relativă

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{tab}}} \cdot 100\%.$$

- Prezentați rezultatul final sub forma

$$\lambda_{\text{exp.}} = (\lambda \pm \Delta\lambda) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \varepsilon = \dots\%.$$

- Trageți concluziile referitor la rezultatele obținute.

ÎNTREBĂRI

- Explicați din ce cauză nu se ia în considerare schimbul de căldură cu calorimetrul.
- De ce trebuie să ștergeți bucățelele de gheață cu hîrtie de filtru?
- Cum se explică creșterea erorilor de măsurare în cazul efectuării rapide a etapelor lucrării de laborator?

TEST DE EVALUARE SUMATIVĂ

PROFIL REAL

1	Completați spațiile punctate astfel încât următoarele afirmații să fie adevărate:	
	a) Forțele de atracție dintre moleculele diferitor medii se numesc	1 p.
	b) Procesul trecerii substanței din ... în ... se numește vaporizare.	1 p.
	c) Umiditatea absolută este mărimea egală cu ... conținută în atmosferă.	1 p.
2	Determinați valoarea de adevăr a următoarelor afirmații, marcând „A” dacă afirmația este adevărată și „F” dacă afirmația este falsă.	
	a) Dacă lichidul udă pereții vasului în care se află, atunci forțele de coeziune sînt mai mari decît cele de adeziune.	<input type="checkbox"/> 1 p.
	b) Corpurile amorfe la temperaturi obișnuite se comportă ca lichidele cu fluiditate foarte mică.	<input type="checkbox"/> 1 p.
	c) Temperatura de fierbere a unui lichid pe vîrfurile unui munte este mai mare decît temperatura de fierbere a aceluiași lichid la poalele muntelui.	<input type="checkbox"/> 1 p.
	Itemii 3 și 4 sînt alcătuiți din cîte două afirmații legate între ele prin conjuncția deoarece . Stabiliți dacă afirmațiile sînt adevărate (scriind A) sau false (scriind F) și dacă între ele există relația cauză–efect (scriind da sau nu).	
3	Aerul umed este mai greu decît cel uscat, aflat în aceleași condiții de presiune și temperatură, deoarece aerul umed conține și molecule de apă.	
	Răspuns:	3 p.
	afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .	
4	Vaporii nesaturați ai unui lichid pot deveni saturați în urma răcirii izocore, deoarece presiunea maximă a vaporilor saturați se micșorează odată cu micșorarea temperaturii.	
	Răspuns:	3 p.
	afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .	

5	Într-un tub capilar petrolul urcă 2 cm. Care este diametrul tubului dacă coeficienții de tensiune superficială și densitatea petrolului sînt, respectiv, egali cu $21 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$ și 800 kg/m^3 .	2 p.
6	Cu cîte procente variază suprafața unui acoperiș din tablă de zinc la creșterea temperaturii de la 0°C pînă la 40°C ? Coeficientul de dilatare liniară a zincului este de $2,6 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.	2 p.
7	O picătură de apă cu raza de 2 mm a fost divizată în două picături mai mici. Coeficientul tensiunii superficiale al apei $\sigma = 0,072 \text{ N/m}$. Determinați:	
	a) variația ariei suprafeței libere a picăturilor de apă;	3 p.
	b) lucrul mecanic efectuat pentru divizarea picăturii de apă.	3 p.
8	O sferă de oțel cu masa de 15,6 kg are volumul $V_0 = 2\,000 \text{ cm}^3$ la temperatura de 0°C . Sfera a fost încălzită pînă cînd volumul ei a devenit $V = 2\,004,6 \text{ cm}^3$ și apoi introdusă într-un vas cu 5 kg de apă la temperatura de 18°C . Ca rezultat, apa și-a mărit temperatura pînă la 30°C . Căldurile specifice ale oțelului și apei sînt $c = 460 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ și $c_a = 4\,200 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, iar capacitatea calorică a vasului se neglijează. Determinați:	
	a) temperatura pînă la care a fost încălzită sfera de oțel;	2 p.
	b) coeficientul de dilatare liniară a oțelului;	3 p.
	c) variația densității sferei de oțel în decursul răcirii acesteia.	3 p.



ELECTRODINAMICA

Secolul al XIX-lea, numit și **secolul electricității**, a fost marcat de importante descoperiri în domeniul fizicii fenomenelor electrice și magnetice. În 1820, Hans Christian Oersted a observat că acul magnetic situat în vecinătatea unui conductor își modifică direcția dacă acesta este parcurs de curent electric. Astfel, s-a stabilit că **curentul electric generează câmp magnetic**. A urmat descoperirea în 1831 de Michael Faraday a **fenomenului inducției electromagnetice**, care stă la baza metodei de obținere a curentului electric folosindu-se câmpul magnetic. Au fost studiate relațiile dintre câmpul electric și cel magnetic, considerate părți componente ale unui câmp general – **câmpul electromagnetic**. Teoria acestui câmp – **electrodinamica** – a fost elaborată în anii 1860–1865 de James Clerk Maxwell, care a prezis existența undelor electromagnetice și a descris proprietățile acestora. Ele au fost descoperite experimental în 1887–1888 de Heinrich Hertz.

Datorită acestor descoperiri, au fost construite generatorul de curent electric, motorul electric, telegrafal, telefonul, radioul etc.

În primele decenii ale secolului al XX-lea s-a dezvoltat intens **fizica atomului**. S-a constatat că interacțiunea electromagnetică menține împreună particulele componente ale atomului, atomii în molecule, iar pe acestea – în corpurile solide și lichide. Cercetarea proprietăților electrice ale semiconductoarelor a condus la inventarea **diodei semiconductoare**, apoi a **tranzistorului**. Aceste descoperiri și invenții, succedate de o amplă revoluție în electronică, au permis miniaturizarea dispozitivelor electronice. Ca rezultat, în ultimele decenii au fost perfecționate considerabil **calculatoarele electronice**, au apărut **telefonia mobilă, internetul** etc.

ELECTROSTATICA

4.1 SARCINILE ELECTRICE. LEGEA CONSERVĂRII SARCINII ELECTRICE. LEGEA LUI COULOMB

Să recapitulăm unele cunoștințe din domeniul fenomenelor electrice. Thales din Milet (cca 624–547 î.Hr.) din Grecia antică a fost primul care a constatat că chihlimbarul frecat cu țesătură de lână atrage corpuri ușoare. Despre chihlimbarul care posedă această proprietate se spune că este **electrizat**. **Gradul de electrizare** este caracterizat de mărimea fizică numită **sarcină electrică**, notată de obicei cu litera q . Unitatea de sarcină electrică în SI se numește **coulomb** (se citește *culon*) și are simbolul C, adică $[q] = C$. Unitatea va fi definită mai târziu.

Ulterior s-a stabilit că prin frecare pot fi electrizate și alte corpuri. Studiindu-se interacțiunea corpurilor electrizate, s-au constatat următoarele:

În natură există două feluri de sarcini electrice: **pozitive și negative**. Sarcinile electrice de același semn se resping, iar cele de semne opuse se atrag.

Explicarea electrizării corpurilor are la bază proprietățile electrice ale atomilor. Conform modelului stabilit de fizicianul englez Ernest Rutherford (1871–1937) la începutul secolului al XX-lea, în centrul atomului se află **nucleul** – o particulă masivă încărcată cu sarcină electrică **pozitivă**, în jurul căruia se mișcă **electronii** – particule încărcate cu sarcină electrică **negativă**.

Nucleele, la rândul lor, sînt constituite din particule de două feluri – **protoni** și **neutroni**. Protonii sînt încărcăți cu sarcină electrică pozitivă, iar neutronii reprezintă particule neutre.

Masele acestor particule sînt: $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$ kg, $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$ kg și $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg. Protonul și neutronul au mase aproximativ egale, iar masa electronului este de circa 1 840 de ori mai mică.

Protonul și electronul au sarcini electrice egale în valoare absolută, semnele lor fiind opuse. Această valoare este cea mai mică sarcină electrică existentă în natură în stare liberă. Ea se numește **sarcină electrică elementară** și se notează cu litera e . Experimental s-a stabilit că $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Astfel, sarcina electrică a protonului $q_p = +e$, iar cea a electronului $q_e = -e$.

Electronii tuturor elementelor din natură sînt identici. Protonii, precum și neutronii,

de asemenea sînt identici, fiecare între ei. Nucleele diferitor elemente chimice se deosebesc între ele.

Din existența în natură a sarcinii electrice elementare e rezultă că sarcina corpului electrizat, numită și **cantitate de electricitate**, este un număr multiplu al sarcinii e , adică

$$q = Ne, \quad (4.1)$$

unde N este un număr întreg, pozitiv sau negativ. Aceasta înseamnă că sarcina electrică este o mărime discontinuă, discretă.

Electrizarea corpurilor este rezultatul trecerii electronilor de la unele corpuri la altele. **Corpul neutru, cedînd un număr de electroni, se încarcă pozitiv, iar primind electroni, se încarcă negativ.**

Multiple experimente demonstrează că în natură se manifestă o legitate în ceea ce privește sarcinile electrice. Înainte de a o formula, introducem o noțiune nouă. Sistemul de corpuri limitat de o suprafață reală sau imaginară prin care nu are loc schimb de sarcini electrice se numește **sistem izolat electric**.

Legitatea menționată mai sus este numită **legea conservării sarcinii electrice**:

Suma algebrică a sarcinilor electrice ale corpurilor dintr-un sistem izolat electric este constantă în timp (se conservă):

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const.} \quad (4.2)$$

Legea conservării sarcinii electrice este o **lege fundamentală a naturii**. Ea se respectă atît în cazul corpurilor mari, cît și în cel al corpurilor microscopice, cum sînt moleculele, atomii și particulele din componența acestora.

Pentru a stabili expresia forței de interacțiune electrică, admitem că dimensiunile spațiale ale corpurilor electrizate sînt mult mai mici decît distanța dintre ele și deci pot fi neglijate. Astfel, obținem **modelul corpului punctiform electrizat**, numit de obicei **sarcină electrică punctiformă**.

Corpul electrizat ale cărui dimensiuni sînt neglijabile în comparație cu distanțele pînă la alte corpuri electrizate este numit corp punctiform electrizat sau sarcină electrică punctiformă.

Acest model este valabil și în cazul bilelor încărcate uniform.

Interacțiunea electrică dintre sarcinile punctiforme a fost studiată experimental de Coulomb cu ajutorul balanței de torsiune (fig. 4.1), inventată de el. De un fir subțire de argint (1) era suspendată de mijloc o bară de sticlă (2). La un capăt al ei era fixată o bilă (3) din miez de soc, iar la celălalt capăt – o contragreutate (4), care asigura poziția orizontală a barei. Acest sistem se afla în interiorul unui vas special pentru a exclude influența curenților de aer.

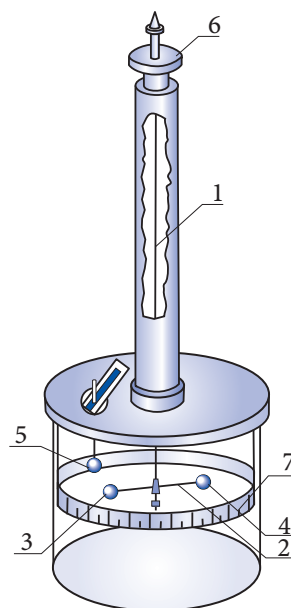
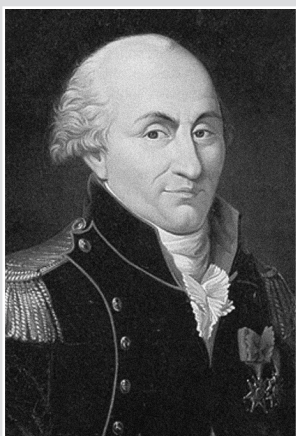


Fig. 4.1



A efectuat cercetări științifice în domeniile mecanicii, electrității și magnetismului. A formulat legile frecării la alunecare (1781) și la rostogolire (1790); a studiat deformările de torsiune ale firelor metalice; a stabilit relația dintre forța ce răsucesce firul, caracteristicile elastice și dimensiunile acestuia, precum și unghiul de răsucire. Aceste cercetări au condus la inventarea, în 1784, a balanței de torsiune, foarte sensibilă, pentru măsurarea forțelor mici. Cu ajutorul acestei balanțe Coulomb a reușit să stabilească experimental, în 1785, legea care exprimă forța de interacțiune dintre sarcinile electrice punctiforme. În 1788 a folosit balanța în scopul studierii interacțiunii dintre polii magnetici.

În onoarea lui Coulomb, legea care exprimă forța de interacțiune dintre sarcinile punctiforme, precum și unitatea de sarcină electrică îi poartă numele.

Prin capacul superior al vasului era introdusă o bară izolatoare, ce avea la capătul inferior o bilă (5) din miez de soc, la același nivel cu bila (3). Capătul superior al firului era fixat într-un cap de suspensie (6), care permitea rotirea firului. Unghiul respectiv putea fi citit pe o scară gradată. La încărcarea bilelor de soc cu sarcini de același semn ele se respingeau și răsuceau firul de argint. Capul de suspensie era rotit, bilele fiind aduse în pozițiile inițiale. Unghiul de răsucire se determina pe baza indicațiilor scării gradate (7) de pe suprafața laterală a vasului și a celei de la capul de suspensie.

Cunoscând parametrii balanței de torsiune și valoarea unghiului de răsucire a firului de argint, Coulomb a calculat forța de respingere dintre bilele de soc pentru valori diferite ale distanței dintre ele și ale sarcinilor de pe ele. La timpul respectiv nu existau metode de măsurare a sarcinilor electrice. Coulomb a folosit o metodă simplă: a modificat într-un anumit mod valorile sarcinilor bilelor. Prin atingerea unei bile încărcate cu o bilă identică neutră sarcina electrică se repartiza în mod egal între ele.

În urma unor măsurători minuțioase Coulomb a stabilit relația dintre forța de interacțiune a sarcinilor punctiforme q_1 și q_2 , valorile acestor sarcini și distanța r dintre ele:

$$F = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2}. \quad (4.3)$$

Două sarcini electrice punctiforme, aflate în repaus, interacționează cu o forță direct proporțională cu produsul dintre valorile sarcinilor și invers proporțională cu pătratul distanței dintre ele. Forțele de interacțiune a sarcinilor sînt orientate de-a lungul drepte pe care sînt situate sarcinile și au sensuri opuse.

Această lege se numește **legea lui Coulomb**.

Legea lui Coulomb se află în concordanță cu principiul acțiunii și reacțiunii.

Coeficientul de proporționalitate k_e din formula (4.3) depinde de proprietățile electrice ale mediului în care se află sarcinile și de unitățile mărimilor ce intervin în ea.

Valoarea acestui coeficient pentru vid, în SI, este:

$$k_e = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}.$$

Această valoare poate fi folosită la rezolvarea problemelor și în cazul în care sarcinile se află în aer, ale cărui proprietăți electrice diferă puțin de cele ale vidului. (*Mai jos se va considera că sarcinile electrice se află în vid.*)

Pentru forța de interacțiune dintre două sarcini electrice punctiforme egale cu câte 1 C fiecare, distanța dintre ele fiind egală cu 1 m, din (4.3) obținem $F = 9 \cdot 10^9 \text{ N}$. Este o forță mare, depășind valorile forțelor de greutate ale piramidelor egiptene. Exemplul respectiv arată că coulombul este o unitate foarte mare de sarcină electrică. De aceea se folosesc submultipli acestuia: nanocoulombul: $1 \text{ nC} = 10^{-9} \text{ C}$, microcoulombul: $1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$, milicoulombul: $1 \text{ mC} = 10^{-3} \text{ C}$.

Coeficientul k_e pentru vid se exprimă, de obicei, printr-o altă constantă ϵ_0 legată cu acesta prin relația:

$$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}. \quad (4.4)$$

Constanta ϵ_0 este numită *permittivitate electrică a vidului* sau *constantă electrică*. Valoarea ei

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k_e} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}.$$

Substituind relația (4.4) în (4.3), scriem legea lui Coulomb sub forma:

$$F = \frac{|q_1||q_2|}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (4.5)$$

De reținut faptul că expresia legii lui Coulomb este similară celei pentru forța gravitațională ce acționează între două corpuri punctiforme:

$$F = K \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (4.6)$$

unde K este constanta gravitațională. Comparînd expresiile (4.5) și (4.6), constatăm că ambele forțe sînt invers proporționale cu pătratul distanței dintre corpurile care interacționează. Valoarea forței de atracție gravitațională este direct proporțională cu produsul dintre masele corpurilor, iar a forței coulombiene – cu produsul dintre sarcinile electrice ale corpurilor. Deosebirea esențială este aceea că forțele gravitaționale sînt numai forțe de atracție, iar forțele coulombiene pot fi atît de atracție, cît și de respingere, în funcție de semnele sarcinilor electrice care interacționează.

Experimentele demonstrează că într-un sistem de sarcini punctiforme interacțiunea dintre oarecare două sarcini nu este influențată de prezența altor sarcini.

Considerăm un sistem concret din trei sarcini punctiforme și reprezentăm forțele care acționează asupra uneia dintre ele, de exemplu asupra sarcinii q_1 (fig. 4.2). Forța \vec{F}_{12} se exprimă prin formula (4.5), nefiind luată în considerare sarcina q_3 . În mod

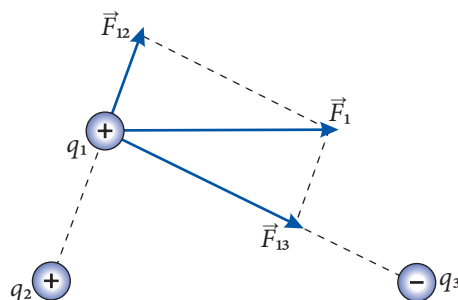


Fig. 4.2

similar se exprimă forța \vec{F}_{13} . Rezultanta forțelor ce acționează asupra sarcinii q_1 este:

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13}.$$

În cazul sistemului format din mai multe sarcini punctiforme, forța rezultantă ce acționează asupra uneia dintre ele, de exemplu q_2 , este:

$$\vec{F}_2 = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{23} + \dots + \vec{F}_{2n}. \quad (4.7)$$

Această relație exprimă **principiul suprapunerii (superpoziției) forțelor**, când se aplică la forțele coulombiene.

Problemă rezolvată

1

Se dă:

$$q_1 = +12 \cdot 10^{-6} \text{ C},$$

$$q_2 = +2 \cdot 10^{-6} \text{ C},$$

$$q_3 = -9 \cdot 10^{-6} \text{ C},$$

$$q_0 = +1,6 \cdot 10^{-6} \text{ C},$$

$$AB = 0,08 \text{ m},$$

$$\alpha = 30^\circ,$$

$$k_e = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

$$F - ?$$

Trei sfere mici, încărcate cu sarcinile electrice $q_1 = +12 \mu\text{C}$, $q_2 = +2 \mu\text{C}$ și $q_3 = -9 \mu\text{C}$, se află în vîrfurile unui triunghi dreptunghic (fig. 4.3), fiind cunoscute lungimea laturii $AB = 8 \text{ cm}$ și unghiul $\alpha = 30^\circ$. Să se determine modulul forței care acționează asupra sferei mici, încărcate cu sarcina electrică $q_0 = +1,6 \mu\text{C}$ și situate în punctul D , unde segmentul AD este perpendicular pe ipotenuza BC a triunghiului.

Rezolvare

Reprezentăm în figura 4.3 forțele care acționează asupra sferei din punctul D , ținînd seama de semnele sarcinilor electrice ale sferelor. Din figură observăm că forțele \vec{F}_2 și \vec{F}_3 sînt coliniare și perpendiculare pe forța \vec{F}_1 . Deci rezultanta

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3$$

are modulul

$$F = \sqrt{F_1^2 + (F_2 + F_3)^2}.$$

Pentru a calcula valorile forțelor, aflăm distanțele respective. Din figura 4.3 obținem:

$$BD = AB \sin \alpha = 0,04 \text{ m}; \quad AD = AB \cos \alpha = 0,04\sqrt{3} \text{ m};$$

$$CD = CB - BD = \frac{AB}{\sin \alpha} - BD = 0,12 \text{ m}.$$

Substituind valorile sarcinilor electrice și ale distanțelor dintre ele în expresia (4.3) a legii lui Coulomb, calculăm forțele:

$$F_1 = 36 \text{ N}; \quad F_2 = 18 \text{ N} \quad \text{și} \quad F_3 = 9 \text{ N}.$$

Pentru forța rezultantă care acționează asupra sarcinii electrice din punctul D obținem: $F = 45 \text{ N}$.

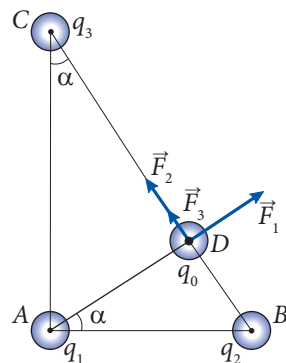


Fig. 4.3

Se dă:

$$r = 1 \text{ mm},$$

$$\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3,$$

$$k_e = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2,$$

$$K = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$$

$$N = ?$$

SI:

$$10^{-3} \text{ m}$$

Două bile mici de oțel cu razele de 1 mm fiecare sînt încărcate cu sarcini electrice negative identice. Cîți electroni trebuie să se afle pe fiecare bilă, pentru ca forța electrică de respingere să fie echilibrată de forța atracției universale?

Rezolvare

Luînd în considerare (4.1), sarcinile electrice ale bilelor sînt $q_1 = q_2 = Ne$. Astfel, conform condițiilor problemei, avem:

$$k_e \frac{N^2 e^2}{l^2} = K \frac{m^2}{l^2},$$

unde l este distanța dintre bile, k_e și K sînt constantele electrică și, respectiv, gravitațională,

iar $m = \rho V = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho$ reprezintă masa fiecărei bile. Așadar:

$$k_e N^2 e^2 = \frac{16}{9} \pi^2 r^6 \rho^2 K,$$

de unde

$$N = \frac{4 \pi \rho r^3}{3e} \sqrt{\frac{K}{k_e}}; N \approx 17\,570.$$

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Cîți electroni are ionul de oxigen O^{2-} ?
2. Calculați variația masei corpului care a primit o sarcină electrică pozitivă egală cu 5,6 mC.
3. Trei corpuri, avînd sarcinile electrice egale cu +2,4 μC , -8,8 μC și +1,6 μC , formează un sistem izolat din punct de vedere electric. În urma unor transformări, sarcinile primelor două corpuri au devenit egale cu -3,2 μC și -0,8 μC . Care este sarcina electrică a corpului al treilea?
4. Două bile metalice identice, A și B, au sarcinile $q_A = +7,2 \mu\text{C}$ și $q_B = +4,8 \mu\text{C}$. Bilele au fost puse în contact, apoi separate una de alta. Care sînt valorile sarcinilor electrice ale bilelor după realizarea contactului? Care bilă a primit electroni și în ce cantitate?
5. O bilă electrizată se află pe axa de simetrie a unui disc electrizat de rază egală cu 3 cm. Poate fi considerat discul drept corp punctiform dacă distanța dintre centrul lui și bilă este egală: a) cu 8 cm; b) cu 10 m?
6. Cum se poate calcula forța de interacțiune dintre două corpuri electrizate care nu pot fi considerate punctiforme?
7. Două corpuri punctiforme electrizate interacționează cu o forță egală cu 1,2 mN. Care va fi valoarea forței de interacțiune a corpurilor dacă distanța dintre ele s-ar mări de 2 ori, iar sarcina unui corp – de 5 ori?
8. Două bile identice, avînd sarcinile electrice egale cu +8 nC și +2 nC, interacționează cu o forță egală cu 1,6 mN. Bilele au fost puse în contact, apoi îndepărtate pînă la distanța inițială. Care este valoarea forței de interacțiune în acest caz?
9. Două bile metalice identice, cu masa de 0,2 g fiecare, sînt suspendate de fire ușoare de mătase de lungimi egale cu cîte 0,6 m. Capetele superioare ale firelor sînt fixate într-un punct comun. Bilele au fost electrizate cu sarcini electrice egale. Să se determine valorile acestor sarcini dacă în urma respingerii bilelor firele de suspensie formează între ele un unghi egal cu 60°.

4.2 CÂMPUL ELECTRIC. INTENSITATEA CÂMPULUI ELECTRIC

Fizicianul și chimistul englez Michael Faraday (1791–1867) a stabilit că interacțiunea corpurilor electrizate se realizează prin intermediul unui mediu material deosebit, care a fost numit **câmp electric**. Astfel, fiecare corp electrizat generează în jurul său un câmp electric, care, la rîndul său, acționează asupra altor corpuri electrizate aflate în acest câmp. În cazul sistemului de două corpuri electrizate se consideră că fiecare din ele se află în câmpul electric generat de celălalt corp. Conform principiului acțiunii și reacțiunii, forțele de interacțiune în ambele cazuri au aceeași valoare, dreaptă-suport comună și sensuri contrare.

Cîmpurile electrice generate de corpurile electrizate care se află în repaus sînt numite **cîmpuri electrostatice**. În acest capitol se studiază doar cîmpurile electrostatice, numite deseori, simplu, **cîmpuri electrice**.

Ipoteza privind existența cîmpurilor materiale a fost folosită deja pentru a descrie atracția universală a corpurilor prin intermediul **cîmpului gravitațional**.

Cîmpul electric acționează asupra corpurilor electrizate introduse în el. Dacă asupra corpului electrizat situat într-un loc al spațiului acționează o forță electrică, rezultă că în acest loc există câmp electric. Prin urmare, pentru a cerceta cîmpul electrostatic, se pot folosi **corpuri electrizate de probă**, numite și **sarcini de probă**. Aceste corpuri, întii de toate, trebuie să fie punctiforme, ceea ce permite cercetarea proprietăților cîmpului în regiuni mici, adică o cercetare mai detaliată. Valoarea sarcinii de probă trebuie să fie mică, pentru a nu modifica cîmpul studiat, a nu deplasa sarcinile electrice care îl generează. Sarcina de probă este considerată convențional pozitivă.

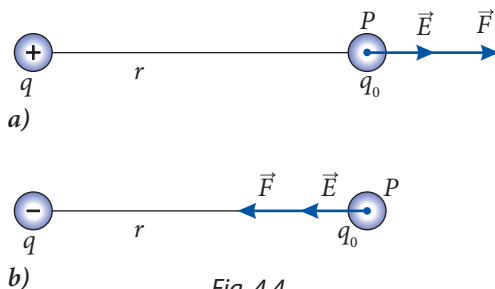


Fig. 4.4

Să cercetăm cîmpul electric al sarcinii punctiforme q . Sarcina punctiformă q_0 este introdusă în punctul P , situat la distanța r de sarcina q (fig. 4.4). Asupra acesteia acționează forța electrică exprimată de legea lui Coulomb:

$$F = k_e \frac{|q| \cdot q_0}{r^2}.$$

Facem raportul:

$$\frac{F}{q_0} = k_e \frac{|q|}{r^2}. \quad (4.8)$$

Observăm că acest raport (4.8) nu depinde de sarcina q_0 , introdusă în punctul P , ci numai de sarcina q , care generează cîmpul, și de poziția punctului P în acest câmp. Prin urmare, raportul (4.8) caracterizează cîmpul electric în punctul dat. El este numit **intensitate a cîmpului electric** și se notează cu \vec{E} .

Astfel, conform definiției:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}. \quad (4.9)$$

Intensitatea câmpului electric în punctul dat este mărimea vectorială egală cu raportul dintre forța care acționează asupra sarcinii punctiforme plasate în acest punct și valoarea sarcinii.

Definiția a fost elaborată în urma cercetării câmpului electric al sarcinii punctiforme, dar este valabilă pentru orice câmp electric.

Unitatea de intensitate a câmpului electric este:

$$[E] = \frac{[F]}{[q_0]} = \frac{\text{N}}{\text{C}}.$$

După cum rezultă din definiția (4.9), cunoașterea intensității câmpului electric permite să se calculeze forța care acționează asupra sarcinii punctiforme situate în punctul respectiv al câmpului:

$$\vec{F} = q_0 \vec{E}. \quad (4.10)$$

Din această cauză se spune că intensitatea \vec{E} este o *caracteristică de forță* a câmpului electric.

Din relațiile (4.8) și (4.9) obținem expresia pentru intensitatea câmpului electrostatic al sarcinii punctiforme în vid (aer):

$$E = k_e \frac{|q|}{r^2} \quad \text{sau} \quad E = \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (4.11)$$

Aici s-a luat în considerare formula (4.4), care exprimă legătura dintre constantele k_e și ϵ_0 .

Observăm că intensitatea câmpului electrostatic al unei sarcini punctiforme este direct proporțională cu valoarea acestei sarcini și invers proporțională cu pătratul distanței de la ea.

Direcția și sensul vectorului intensității \vec{E} , după cum rezultă din definiția (4.9), coincid cu direcția și sensul forței care acționează asupra sarcinii punctiforme pozitive introduse în punctul dat al câmpului (fig. 4.4). Astfel, intensitatea câmpului electrostatic generat de o sarcină punctiformă pozitivă este orientată radial de la sarcină (fig. 4.4, a) și radial spre sarcină în cazul în care aceasta este negativă (fig. 4.4, b).

Să cercetăm un câmp electrostatic generat de câteva sarcini, de exemplu de trei sarcini punctiforme (fig. 4.5). Acestea acționează asupra sarcinii de probă q_0 introdusă în punctul arbitrar P cu forțele \vec{F}_1 , \vec{F}_2 și \vec{F}_3 , care pot fi exprimate prin intensitățile \vec{E}_1 , \vec{E}_2 și \vec{E}_3 ale câmpurilor generate de fiecare din cele trei sarcini în parte. În conformitate cu formula (4.10), avem:

$$\vec{F}_1 = q_0 \vec{E}_1, \vec{F}_2 = q_0 \vec{E}_2, \vec{F}_3 = q_0 \vec{E}_3.$$

Forța rezultantă aplicată sarcinii de probă este egală cu suma forțelor cu care acționează asupra ei fiecare din cele trei sarcini (vezi formula 4.7). Avem:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = q_0 (\vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3).$$

Pe de altă parte, între forța rezultantă \vec{F} și intensitatea \vec{E} a câmpului electrostatic

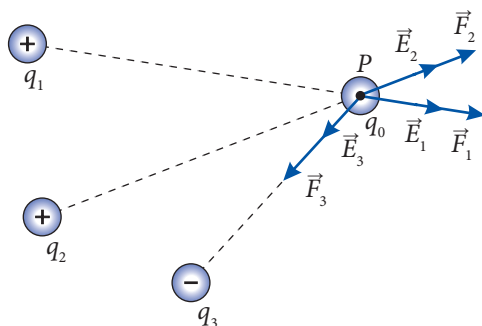


Fig. 4.5

rezultant există relația $\vec{F} = q_0 \vec{E}$. Comparînd ambele expresii pentru forța \vec{F} , obținem:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3. \quad (4.12)$$

Intensitatea cîmpului electric generat într-un punct al spațiului de un sistem de corpuri punctiforme electrizate este egală cu suma vectorială a intensităților cîmpurilor generate separat de fiecare corp electrizat în acest punct.

Această afirmație este numită **principiul superpoziției cîmpurilor electrice**.

Pentru a obține o imagine a cîmpului electrostatic, Faraday a introdus conceptul de **linie de intensitate a cîmpului electric**, numită de asemenea **linie de forță** a cîmpului.

Linia imaginară, a cărei tangentă în fiecare punct are direcția vectorului intensității \vec{E} în acest punct, se numește **linie de intensitate a cîmpului electric** (fig. 4.6).

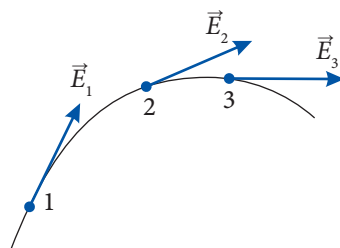


Fig. 4.6

Liniei de intensitate i se atribuie sensul care coincide cu cel al vectorului \vec{E} . În fiecare punct al cîmpului vectorul \vec{E} este o mărime strict determinată. Adică, prin fiecare punct al cîmpului poate trece numai o linie de intensitate și, prin urmare, două sau mai multe linii nu se intersectează.

Să examinăm imaginile liniilor de intensitate ale unor cîmpuri electrostatice concrete. Se știe că intensitatea cîmpului electric al sarcinii punctiforme are direcție radială. Aceeași direcție o au și liniile de intensitate (fig. 4.7), care sînt orientate de la sarcină, dacă ea este pozitivă (fig. 4.7, a), și spre sarcină, în cazul în care aceasta este negativă (fig. 4.7, b). În figura 4.8, a sînt reprezentate liniile de intensitate ale cîmpului electrostatic generat de două sarcini punctiforme egale în modül, dar de semne opuse, iar în figura 4.8, b – liniile de intensitate a două sarcini pozitive egale în modül.

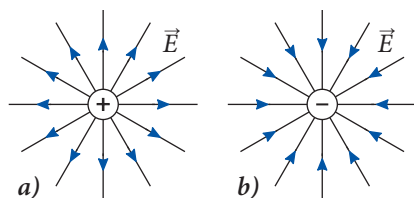


Fig. 4.7

Din figurile 4.7 și 4.8 se observă că densitatea liniilor de intensitate este mai mare în regiunile învecinate sarcinilor, adică în regiunile în care intensitatea cîmpului electric este mai mare. Această legătură dintre valoarea intensității cîmpului electric și densitatea liniilor de intensitate este valabilă pentru toate cîmpurile electrostatice.

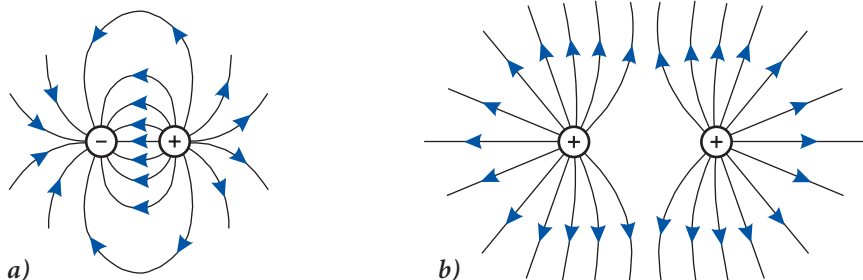


Fig. 4.8

Cîmp omogen este numit cîmpul electric al cărui vector de intensitate \vec{E} este constant.

Rezultă că liniile de intensitate ale cîmpului omogen sînt segmente de dreaptă paralele între ele și echidistante. Un cîmp omogen poate fi obținut încărcînd două plăci paralele și destul de mari cu sarcini electrice egale în modül și de semne opuse (fig. 4.9). Din figură se observă că în regiunile de la marginile plăcilor cîmpul nu este omogen.

Liniile de intensitate încep pe sarcinile pozitive și se termină pe cele negative. În cazul unei sarcini pozitive izolate, ele încep pe sarcină și iau sfîrșit la infinit, iar în cazul unei sarcini negative izolate, încep la infinit și se sfîrșesc pe această sarcină.

Să analizăm un tabel ce reflectă analogia între cîmpul gravitațional și cel electrostatic:

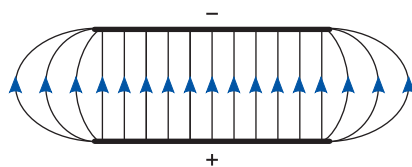


Fig. 4.9

CÎMPUL

gravitațional \longleftrightarrow electrostatic

CARACTERUL INTERACȚIUNII

atracție în toate cazurile \longleftrightarrow atracție sau respingere în funcție de semnele sarcinilor electrice

FORȚA

Legea atracției universale \longleftrightarrow Legea lui Coulomb

$$F = K \frac{m_1 m_2}{r^2}; \quad \longleftrightarrow \quad F = k_e \frac{|q_1| |q_2|}{r^2};$$

Constanta gravitațională \longleftrightarrow Constanta $k_e = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$;

$$K = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \quad \longleftrightarrow \quad \epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k_e} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}$$

INTENSITATEA CÎMPULUI

$$\vec{\Gamma} = \frac{\vec{F}}{m_0} \quad \longleftrightarrow \text{definiții} \quad \longleftrightarrow \quad \vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

$$|\Gamma| = \frac{\text{N}}{\text{kg}} = \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad \longleftrightarrow \text{unități} \quad \longleftrightarrow \quad [E] = \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

$$\Gamma = K \frac{m}{r^2} \leftarrow \text{pentru corpul punctiform} \rightarrow E = k_e \frac{|q|}{r^2}$$

Problemă rezolvată

1

Se dă:

$$\begin{aligned} q_1 &= -q, \\ q_2 &= -4,5 q, \\ \frac{E_1}{E_2} &= 2, \\ l &= 10 \text{ cm} \\ x &= ? \end{aligned}$$

SI:

$$0,1 \text{ m}$$

m

Două sfere mici sînt încărcate cu sarcinile de același semn $q_1 = -q$ și $q_2 = -4,5 q$. Determinați poziția punctelor, în care intensitatea cîmpului creat de sarcina q_1 este de 2 ori mai mare decît a celui creat de sarcina q_2 . Distanța dintre sarcini este $l = 10 \text{ cm}$.

Rezolvare

Deoarece intensitatea câmpului electric este o mărime vectorială, vor exista două puncte A și B (vezi *fig. 4.10*), în care se îndeplinește condiția problemei $E_1 = 2E_2$: cînd vectorii \vec{E}_1 și \vec{E}_2 sînt de sensuri opuse (punctul A) și cînd ei sînt de același sens (punctul B). Notăm cu x distanța de la sarcina q_1 pînă la punctul A ($x = x_1$) sau pînă la punctul B ($x = x_2$). Folosind relația (4.11) și condițiile problemei, ajungem la egalitatea:

$$k_e \frac{|q_1|}{x^2} = 2k_e \frac{|q_2|}{(l-x)^2}$$

sau

$$\frac{1}{x^2} = \frac{9}{(l-x)^2}.$$

Din această relație reiese următoarea ecuație de gradul doi:

$$8x^2 + 2lx - l^2 = 0.$$

Rezolvînd ecuația dată, obținem soluțiile:

$$x_{1,2} = \frac{-2l \pm \sqrt{4l^2 + 32l^2}}{16} = \frac{-l \pm 3l}{8}$$

sau

$$x_1 = \frac{l}{4} = 2,5 \text{ cm}; x_2 = -\frac{l}{2} = -5 \text{ cm}.$$

Așadar, intensitatea câmpului electric creat de sarcina q_1 este de 2 ori mai mare decît cea a câmpului creat de sarcina q_2 în punctele: A situat între sarcini la distanța $x_1 = 2,5 \text{ cm}$ de la sarcina q_1 și $l - x_1 = 7,5 \text{ cm}$ de la sarcina q_2 ; B situat de partea stîngă a sarcinii q_1 la distanța $|x_2| = 5 \text{ cm}$ de la ea și $l + |x_2| = 15 \text{ cm}$ de la sarcina q_2 .

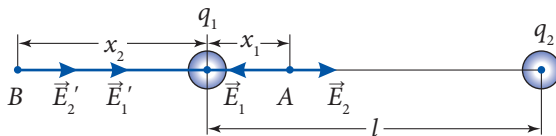


Fig. 4.10

Problemă rezolvată

2

Se dă:

$q_1 = 3 \cdot 10^{-9} \text{ C}$,
 $q_2 = 5 \cdot 10^{-9} \text{ C}$,
 $q_3 = -1 \cdot 10^{-9} \text{ C}$,
 $q_4 = 2 \cdot 10^{-9} \text{ C}$,
 $a = 0,06 \text{ m}$,
 $k_e = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$
 $E = ?$

În vîrfurile unui pătrat cu latura de 6 cm se află patru corpuri punctiforme, ale căror sarcini electrice sînt, respectiv, egale cu 3 nC , 5 nC , -1 nC și 2 nC . Determinați intensitatea câmpului electric în centrul pătratului.

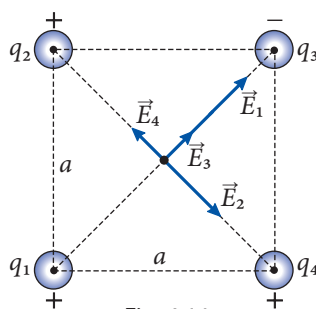


Fig. 4.11

Rezolvare

Reprezentăm în *figura 4.11* sistemul de sarcini electrice și vectorii intensității câmpurilor electrice generate de aceste sarcini. Vectorii își au originile în centrul pătratului, iar sensurile lor sînt determinate de semnele sarcinilor respective. Pentru intensitatea câmpului rezultat în centrul pătratului, în conformitate cu principiul superpoziției, avem:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \vec{E}_4.$$

Adunăm cîte doi vectori orientați de-a lungul aceleiași diagonale. Vectorul $(\vec{E}_1 + \vec{E}_3)$ are modulul egal cu $(E_1 + E_3)$, iar vectorul $(\vec{E}_2 + \vec{E}_4)$ are modulul $|E_2 - E_4|$. Vectorii $(\vec{E}_1 + \vec{E}_3)$ și $(\vec{E}_2 + \vec{E}_4)$ sînt reciproc perpendiculari. Prin urmare, modulul rezultantei lor

$$E = \sqrt{(E_1 + E_3)^2 + (E_2 - E_4)^2}.$$

Distanțele dintre sarcini și centrul pătratului sînt egale cu jumătate din lungimea diagonalei lui, adică cu $a\sqrt{2}/2$.

Pentru modulii intensității cîmpurilor generate separat de fiecare sarcină avem:

$$E_1 = k_e \frac{2q_1}{a^2}, \quad E_2 = k_e \frac{2q_2}{a^2}, \quad E_3 = k_e \frac{2|q_3|}{a^2} \quad \text{și} \quad E_4 = k_e \frac{2q_4}{a^2}.$$

Substituind aceste mărimi în expresia pentru intensitatea cîmpului rezultat, obținem:

$$E = \frac{2k_e}{a^2} \sqrt{(q_1 + q_3)^2 + (q_2 - q_4)^2}; \quad E = 25 \text{ kN/C}.$$

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Depinde oare intensitatea cîmpului electric într-un punct dat de prezența în el a sarcinii de probă?
2. Depinde oare sensul vectorului intensității \vec{E} de semnul sarcinii electrice care generează cîmpul? Dar de semnul sarcinii de probă?
3. Conform definiției, intensitatea cîmpului electric $\vec{E} = \vec{F}/q_0$. Se poate afirma că intensitatea cîmpului electric este direct proporțională cu forța care acționează asupra sarcinii de probă și invers proporțională cu valoarea acestei sarcini? Argumentați răspunsul.
4. Forța care acționează asupra unei sarcini punctiforme de $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ din partea cîmpului electric este egală cu $6 \cdot 10^{-3} \text{ N}$. Ce forță va acționa asupra sarcinii punctiforme de $3,5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ introdusă în același punct al cîmpului?
5. Intensitatea cîmpului electric în punctul situat la 15 cm de la o sarcină punctiformă este egală cu 400 N/C. Care este intensitatea cîmpului electric în punctul ce se află la 12 cm de la sarcină?
6. În două vîrfuri ale unui triunghi echilateral avînd lungimea laturii egală cu 6 cm se află sarcinile punctiforme egale cu +20 nC și -20 nC. Calculați intensitatea cîmpului electric în vîrfurile al treilea al triunghiului.
7. Două sfere mici sînt încărcate cu sarcinile pozitive $q_1 = +q$ și $q_2 = +4q$ și se află la distanța $l = 15 \text{ cm}$ una de alta. Determinați poziția punctului în care intensitatea cîmpului electric rezultat este nulă.

4.3 LUCRUL CÎMPULUI ELECTRIC LA DEPLASAREA SARCINII PUNCTIFORME. POTENȚIALUL ELECTRIC

a. Cîmpul electrostatic – cîmp potențial

Să cercetăm un corp punctiform electrizat cu sarcina q_0 aflat într-un cîmp electrostatic de intensitate \vec{E} . Asupra corpului acționează forța electrică $\vec{F} = q_0 \vec{E}$. La deplasarea corpului această forță, și anume cîmpul electric, efectuează un lucru mecanic. Să analizăm factorii de care depinde valoarea lucrului efectuat.

În cursul de mecanică s-a constatat că lucrul mecanic, în general, este o mărime de proces, adică depinde atât de pozițiile inițială și finală ale corpului în mișcare, cît și de forma traiectoriei sale între aceste poziții. Calculînd lucrul efectuat de forța constantă de greutate, s-a stabilit că valoarea acestuia nu depinde de forma traiectoriei corpului, ci doar de poziția inițială și de cea finală. Respectiv, lucrul forței de greutate pe o traiectorie închisă este nul. Forțele care posedă această proprietate au fost numite **conservative**, iar cîmpurile lor – **cîmpuri potențiale**.

Examinăm sarcina de probă q_0 care se deplasează într-un cîmp electric omogen ($\vec{E} = \text{const.}$). Situația este similară celei din cazul corpului punctiform de masă m , care se deplasează într-un cîmp gravitațional omogen ($\vec{g}_x = \text{const.}$). În ambele cazuri forțele care acționează asupra corpului sînt constante: forța gravitațională $\vec{F}_{gr} = m\vec{g}_x$ și forța electrică $\vec{F}_{el} = q_0\vec{E}$.

Putem presupune că lucrul efectuat de cîmpul omogen **nu depinde** de forma traiectoriei parcurse de sarcina de probă, ci doar de pozițiile inițială și finală ale acesteia.

Pentru a confirma presupunerea, calculăm lucrul efectuat de cîmp la deplasarea sarcinii q_0 din poziția arbitrară 1 în poziția 2 pe căi diferite (fig. 4.12).

Considerăm traiectoria 1a2, unde segmentul 1a este paralel cu vectorul \vec{E} , iar segmentul a2 este perpendicular pe \vec{E} . Lucrul cîmpului pe ultimul segment este nul. Avem $L_{1a2} = L_{1a} = Fd = q_0Ed$, unde cu d s-a notat lungimea segmentului 1a.

Analizăm traiectoria mai complicată 1bcefg2, formată din segmentele 1b, ce și fg de lungimi egale cu d_1 , d_2 și d_3 și fiind paralele cu vectorul intensității cîmpului electric \vec{E} , precum și din segmentele bc, ef, g2 perpendiculare pe acest vector. Pe ultimele segmente lucrul cîmpului este nul, deci $L_{1bcefg2} = L_{1b} + L_{ce} + L_{fg} = Fd_1 + Fd_2 + Fd_3 = q_0E(d_1 + d_2 + d_3)$. Dar $d_1 + d_2 + d_3 = d$, prin urmare, lucrul $L_{1bcefg2} = q_0Ed$. S-a obținut aceeași valoare: $L_{1bcefg2} = L_{1a2}$.

Evident, orice altă traiectorie dintre punctele 1 și 2 poate fi aproximată cu o linie frîntă, asemenea celei din cazul precedent, or în urma calculului se va obține aceeași valoare pentru lucrul efectuat de cîmp.

Prin urmare, lucrul cîmpului electric omogen de intensitate \vec{E} la deplasarea sarcinii punctiforme q_0 din punctul 1 în 2 este:

$$L_{12} = q_0Ed_{12}\cos\alpha = q_0Ed, \quad (4.13)$$

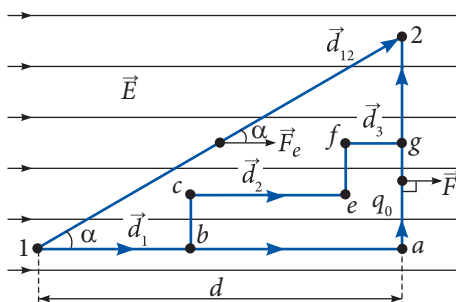


Fig. 4.12

unde d este proiecția vectorului deplasării \vec{d}_{12} pe direcția intensității \vec{E} .

Valoarea lucrului câmpului electric nu depinde de forma traiectoriei parcurse de sarcina punctiformă, deci **câmpul electrostatic omogen este un câmp potențial**.

Considerăm câmpul electrostatic generat de o sarcină punctiformă q . Să calculăm lucrul efectuat de câmp la deplasarea sarcinii de probă q_0 dintr-o poziție oarecare 1 în poziția finală 2 (fig. 4.13).

Admitem mai întâi că sarcina q_0 se deplasează de-a lungul porțiunii radiale $1a$, apoi de-a lungul arcului de cerc $a2$. Lucrul $L_{1a2} = L_{1a} + L_{a2}$. Pe porțiunea de arc forța electrică $\vec{F} = q_0 \vec{E}$, fiind radială, este permanent perpendiculară pe deplasarea elementară, deci lucrul ei este nul: $L_{a2} = 0$. Avem $L_{1a2} = L_{1a}$.

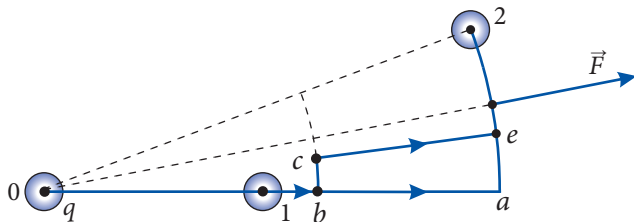


Fig. 4.13

Să calculăm lucrul efectuat de câmp la deplasarea sarcinii q_0 pe traiectoria $1bce2$, formată din două segmente radiale ($1b$ și ce) și din două porțiuni de arc de cerc (bc și $e2$). Lucrul pe porțiunile de arc este nul, deci $L_{1bce2} = L_{1b} + L_{ce}$. Din figură se observă că segmentele radiale ba și ce au lungimi egale, iar capetele lor b și c se află la distanțe egale de la sarcina q . Rezultă că valorile forței electrice în punctele respective ale acestor segmente sînt egale, deci sînt egale și lucrurile efectuate de câmpul electric: $L_{ba} = L_{ce}$. Obținem $L_{1bce2} = L_{1b} + L_{ba} = L_{1a}$, valoare egală cu cea a lucrului efectuat pe traiectoria $1a2$.

O traiectorie arbitrară dintre punctele 1 și 2 poate fi aproximată cu o linie alcătuită dintr-un număr mare de segmente radiale și de porțiuni de arc de cerc. În baza unor raționamente similare celor de mai sus, se ajunge la concluzia că lucrul câmpului electrostatic generat de o sarcină punctiformă depinde doar de poziția inițială și de cea finală ale sarcinii de probă, și nu de forma traiectoriei dintre aceste poziții.

Pornind de la principiul superpoziției câmpurilor electrice, putem considera că orice câmp electrostatic este generat de un sistem anumit de sarcini punctiforme. Generalizînd rezultatele de mai sus, rezumăm:

Lucrul efectuat de câmpul electrostatic arbitrar la deplasarea în el a unei sarcini punctiforme (de probă) nu depinde de forma traiectoriei parcurse, ci doar de pozițiile inițială și finală ale acesteia. Deci câmpul electrostatic este un câmp potențial, iar forța care acționează din partea lui asupra sarcinii punctiforme este o forță conservativă.

b. Lucrul câmpului electric. Potențialul electric

Din cursul de mecanică cunoaștem că lucrul mecanic al forței conservative se exprimă prin energia potențială

$$L_{12} = W_{p1} - W_{p2}, \quad (4.14)$$

aplicabilă și în electrostatică. Cu W_p este notată energia potențială a sarcinii punctiforme q_0 în punctul respectiv al câmpului electrostatic.

Forța care acționează asupra sarcinii punctiforme din partea câmpului electrostatic

($\vec{F} = q_0 \vec{E}$) este direct proporțională cu valoarea sarcinii. Prin urmare, lucrul efectuat de câmp la deplasarea sarcinii este proporțional cu sarcina. Din relația (4.14) rezultă că și energia potențială W_p a sarcinii q_0 , aflată într-un punct oarecare al câmpului electrostatic, este direct proporțională cu valoarea sarcinii ($W_p \sim q_0$).

Conchidem că raportul W_p/q_0 dintre energia potențială și sarcină nu depinde de valoarea sarcinii. Acest raport este în funcție de punctul câmpului electrostatic în care se află sarcina și prezintă o mărime scalară ce caracterizează câmpul în acest punct. Ea este numită **potențial electric** și se notează cu φ .

Se numește **potențial în punctul dat al câmpului electrostatic mărimea fizică scalară egală cu raportul dintre energia potențială a sarcinii punctiforme aflate în acest punct al câmpului și mărimea sarcinii**:

$$\varphi = \frac{W_p}{q_0}. \quad (4.15)$$

Unitatea de potențial este numită **volt** și se notează cu litera V. Din (4.15) rezultă:

$$[\varphi] = \frac{[W_p]}{[q_0]} = \frac{J}{C} = V.$$

Cunoscînd potențialul electric în punctul dat al câmpului, se poate determina energia potențială a sarcinii punctiforme introdusă în acest punct al câmpului:

$$W_p = q_0 \varphi. \quad (4.16)$$

Potențialul este o **caracteristică energetică** a câmpului electric. Amintim că intensitatea câmpului electric (mărime vectorială) este **caracteristică de forță**.

Substituind relația (4.16) în formula (4.14), pentru lucrul efectuat de câmpul electrostatic, obținem expresia:

$$L_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (4.17)$$

Mărimea $(\varphi_1 - \varphi_2)$ se numește **diferență de potențial**. Ca și potențialul, ea se exprimă în volți.

Relația (4.17) permite să definim **voltul**:

Voltul este diferența de potențial dintre două puncte ale câmpului electrostatic, la deplasarea între care a sarcinii punctiforme de 1 coulomb se efectuează un lucru mecanic de 1 joule.

Diferența de potențial dintre două puncte ale câmpului electrostatic este numită de asemenea **tensiune electrică** și se notează cu U . Astfel, tensiunea electrică

$$U = \varphi_1 - \varphi_2, \quad (4.18)$$

iar lucrul mecanic

$$L_{12} = q_0 U. \quad (4.19)$$

Relația (4.17) sau (4.19) permite introducerea unei unități noi a lucrului și a energiei, care este folosită pe larg în electronică, în fizica atomului și a nucleului atomic. Această unitate se numește **electronvolt** și se notează eV. Sarcina electrică a electronului este $e = -1,6 \cdot 10^{-19} C$. Admitem că electronul se deplasează între două puncte, diferența de potențial dintre care este egală cu $(-1) V$. În acest caz câmpul efectuează un lucru egal cu $(-1,6) \cdot 10^{-19} C \cdot (-1 V) = 1,6 \cdot 10^{-19} J$. Cu această valoare se mărește energia electronului.



Preocupările principale ale lui Volta vizează domeniul fenomenelor electrice. A perfecționat electroforul (1775) – un dispozitiv electrostatic, alcătuit din două discuri: unul dielectric și altul metalic. Primul disc este electrizat prin frecare, iar al doilea prin influență, fiind apropiat de discul dielectric. A construit electroscoful sensibil cu fire de paie (1781); un electrometru cu condensator (1787), care permite cercetarea surselor slabe de electricitate.

Continuând experimentele lui Galvani legate de „electricitatea animală” (contractarea țesuturilor musculare sub acțiunea descărcării electrice), a descoperit electrizarea reciprocă a metalelor de natură diferită la punerea lor în contact. Aceasta i-a permis să inventeze prima sursă de curent electric continuu – pila electrică (1799), care reprezenta 20 de perechi de discuri

de cupru și de zinc, separate de discuri de postav umezit cu apă sărată.

Volta a studiat dilatarea termică a aerului, a descoperit metanul (1776) și a construit prima lampă cu gaze naturale.

În prezent sînt cunoscute: electroforul Volta, diferența de potențial de contact Volta, pila Volta, voltmetrul și unitatea de tensiune electrică – voltul.

Un electronvolt este egal cu variația energiei electronului la deplasarea lui între două puncte ale câmpului electric, diferența de potențial dintre care este egală cu 1 volt:

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

Formula (4.17) arată că lucrul efectuat definește diferența de potențial:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{L_{12}}{q_0}. \quad (4.20)$$

Diferența de potențial dintre două puncte ale câmpului electrostatic este egală cu raportul dintre lucrul efectuat de câmp la deplasarea unei sarcini punctiforme între aceste puncte și mărimea acestei sarcini.

Relația (4.20) determină diferența de potențial, și nu valorile potențialului în punctele respective. Diferența de potențial nu se modifică dacă la fiecare valoare a potențialului adunăm una și aceeași constantă arbitrară. Considerînd potențialul $\varphi' = \varphi + \text{const.}$, pentru diferența de potențial avem:

$$\varphi'_1 - \varphi'_2 = (\varphi_1 + \text{const.}) - (\varphi_2 + \text{const.}) = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Constanta arbitrară se alege din considerente de comoditate. De obicei, se consideră că potențialul este nul la distanțe destul de mari de la sarcina electrică ce generează câmpul. În unele probleme se consideră nul potențialul Pămîntului. Punctul al cărui potențial este considerat nul se numește **punct de referință**. Din relația (4.16) rezultă că și energia potențială a sarcinii de probă, aflată în punctul de referință, este nulă.

Notăm cu L_{10} lucrul efectuat de câmpul electric la deplasarea sarcinii q_0 din punctul 1 în punctul de referință, în care $\varphi_0 = 0$. În acest caz din (4.20) pentru potențial avem:

$$\varphi_1 = \frac{L_{10}}{q_0}. \quad (4.21)$$

Potențialul în punctul dat al câmpului electrostatic este egal cu raportul dintre lucrul efectuat de câmp la deplasarea unei sarcini punctiforme din acest punct în punctul de referință și mărimea sarcinii deplasate.

Să stabilim o relație dintre intensitatea câmpului electric și diferența de potențial, examinînd un câmp omogen și două puncte, 1 și 2, situate pe o linie de intensitate (fig. 4.14) la distanța d unul de altul. Notăm cu φ_1 și φ_2 potențialele electrice în aceste puncte. Lucrul efectuat la deplasarea sarcinii q_0 între ele este:

$$L_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Lucrul poate fi exprimat și prin intensitatea \vec{E} a câmpului electric (vezi formula 4.13):

$$L_{12} = Fd = q_0Ed.$$

Din ultimele două expresii obținem:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = Ed \quad (4.22)$$

și

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}. \quad (4.23)$$

Aceste relații permit calculul diferenței de potențial, dacă este cunoscută intensitatea câmpului electric omogen, precum și a intensității câmpului, în cazul în care se știe potențialul în puncte diferite ale acestuia.

Din relația (4.23) stabilim o altă unitate a intensității câmpului electric:

$$[E] = \frac{[\varphi_1 - \varphi_2]}{[d]} = \frac{\text{V}}{\text{m}}.$$

De remarcat că o sarcină punctiformă lăsată liber într-un câmp electrostatic se va mișca în sensul accelerației imprimată de forța electrică, adică în sensul acestei forțe. În cazul sarcinii pozitive, forța electrică are sensul intensității \vec{E} . Prin urmare, **sarcina pozitivă lăsată liber într-un câmp electrostatic se deplasează în sensul intensității câmpului \vec{E}** , adică, după cum rezultă din formula (4.23) și din figura 4.14, **în sensul în care potențialul electric descrește. Sarcina negativă lăsată liber într-un câmp electrostatic se deplasează în sens opus vectorului \vec{E} , adică în sensul în care crește potențialul electric.**

Considerăm sarcina punctiformă q în al cărei câmp electrostatic se mișcă sarcina de probă q_0 .

Forța coulombiană, invers proporțională cu pătratul distanței dintre sarcinile punctiforme, este una variabilă. Lucrul efectuat de ea nu poate fi calculat prin metodele matematicii elementare, din care cauză dăm expresia pentru potențialul φ al sarcinii electrice punctiforme fără deducere, și anume:

$$\varphi = k_e \frac{q}{r} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (4.24)$$

Potențialul câmpului electrostatic generat de o sarcină punctiformă este direct proporțional cu valoarea acestei sarcini și invers proporțional cu distanța de la ea.

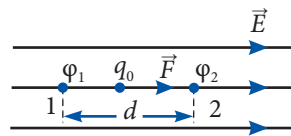


Fig. 4.14

În cazul în care câmpul electrostatic este generat de mai multe sarcini punctiforme, potențialul într-un punct al acestuia este egal cu suma potențialelor câmpurilor create de fiecare sarcină în parte: $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots$. Principiul superpoziției câmpurilor electrice are loc pentru ambele caracteristici ale acestora: intensitatea \vec{E} și potențialul φ .

c.* Suprafețe echipotențiale

După cum s-a demonstrat în par. 4.2, câmpul electrostatic poate fi reprezentat (grafic) cu ajutorul liniilor de intensitate, în orice punct al acestor linii imaginea vectorului intensității câmpului \vec{E} fiind tangent la linia respectivă.

Introducerea celei de-a doua caracteristici a câmpului – potențialul electric φ – permite o altă reprezentare grafică a câmpului electrostatic, cu ajutorul așa-numitelor **suprafețe echipotențiale**.

Se numește **echipotențială** suprafața în toate punctele căreia potențialul are una și aceeași valoare: $\varphi = \text{const.}$

Din definiție rezultă că diferența de potențial dintre orice două puncte ale suprafeței echipotențiale este nulă. În acest caz, conform formulei (4.17), la deplasarea sarcinii punctiforme pe suprafața echipotențială lucrul forțelor electrice este egal cu zero. Deci forțele electrice, precum și liniile de intensitate ale câmpului electrostatic, sînt perpendiculare pe suprafețele echipotențiale în punctele de intersecție cu acestea.

Să cercetăm niște câmpuri concrete.

Liniile de intensitate ale câmpurilor electrostatice omogene sînt linii drepte, paralele între ele și echidistante. Suprafețele echipotențiale sînt plane perpendiculare pe liniile de intensitate, plane paralele între ele (fig. 4.15). În figură liniile de intensitate sînt reprezentate prin linii continue, avînd săgeți ce indică sensul vectorului \vec{E} , iar suprafețele echipotențiale – prin linii întrerupte. Amintim că potențialul se micșorează în sensul indicat de vectorul intensității.

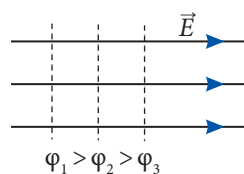


Fig. 4.15

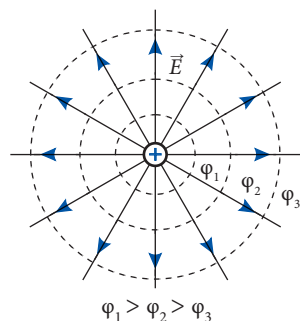


Fig. 4.16

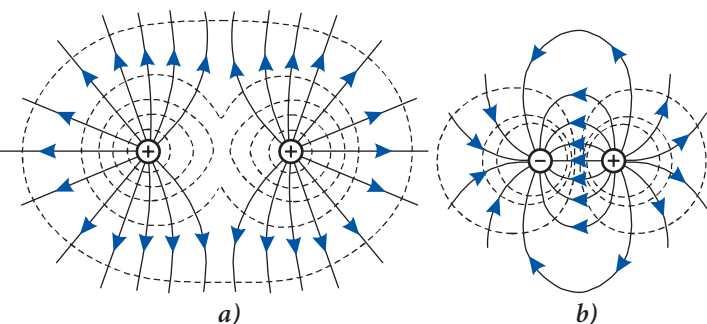


Fig. 4.17

Potențialul câmpului electrostatic generat de o sarcină punctiformă, după cum se vede din formula (4.24), are una și aceeași valoare în toate punctele situate la distanțe egale r de la sarcina punctiformă. Prin urmare, suprafețele echipotențiale ale câmpului sarcinii punctiforme sînt suprafețe sferice, avînd sarcina în centrul lor comun (fig. 4.16).

Din figură se observă că în punctele de intersecție liniile de intensitate, fiind radiale, sînt normale la suprafețele echipotențiale.

În figura 4.17 (vezi p. 151) sînt reprezentate suprafețele echipotențiale (cu linii întrerupte) și liniile de intensitate (cu linii continue) ale cîmpului electric, generat de două bile metalice încărcate cu sarcini electrice pozitive de valori egale (fig. 4.17, a) și cu sarcini electrice de valori egale, dar de semne opuse (fig. 4.17, b).

Problemă rezolvată

1

Se dă:

$c = 10 \text{ cm}$,
 $q_1 = q = 8 \text{ } \mu\text{C}$,
 $q_2 = 4 q_1$,
 $q_0 = 1 \text{ } \mu\text{C}$

SI:

$0,1 \text{ m}$,
 $8 \cdot 10^{-6} \text{ C}$,
 10^{-6} C

$L = ?$

J

La capetele ipotenuzei $c = 10 \text{ cm}$ a unui triunghi dreptunghic, cu unghiul $\alpha = 30^\circ$, se află sarcinile punctiforme $q_1 = q = 8 \text{ } \mu\text{C}$ și $q_2 = 4 q_1$. Determinați lucrul efectuat pentru deplasarea unei sarcini de probă $q_0 = 1 \text{ } \mu\text{C}$ din punctul D în punctul C (fig. 4.18) de-a lungul înălțimii coborîte din vîrfurile unghiului drept.

Rezolvare

În conformitate cu relația (4.17),

$$L = q_0 (\varphi_D - \varphi_C)$$

și problema se reduce la determinarea potențialelor φ_C și φ_D , care se calculează cu ajutorul expresiei (4.24). Întrucît în fiecare dintre punctele C și D potențialul este creat de ambele sarcini q_1 și q_2 , pentru φ_C și φ_D avem:

$$\varphi_C = \frac{k_e q_1}{CB} + \frac{k_e q_2}{CA}; \quad \varphi_D = \frac{k_e q_1}{BD} + \frac{k_e q_2}{AD}.$$

Din figura 4.18 rezultă $CB = AB \sin 30^\circ = c/2$; $CA = AB \cos 30^\circ = \sqrt{3} c/2$; $BD = CB \sin 30^\circ = c/4$; $AD = AC \cos 30^\circ = 3 c/4$, iar conform condiției problemei, $q_2 = 4 q_1$. Atunci:

$$\varphi_C = \frac{2k_e q}{c} + \frac{8k_e q}{\sqrt{3}c} = \frac{2k_e q}{\sqrt{3}c} (\sqrt{3} + 4),$$

$$\varphi_D = \frac{4k_e q}{c} + \frac{16k_e q}{3c} = \frac{28k_e q}{3c}$$

și pentru lucrul efectuat obținem:

$$L = q_0 \left[\frac{28k_e q}{3c} - \frac{2k_e q}{\sqrt{3}c} (\sqrt{3} + 4) \right] = \frac{2k_e q_0 q}{3c} (11 - 4\sqrt{3}); \quad L \approx 2 \text{ J}.$$

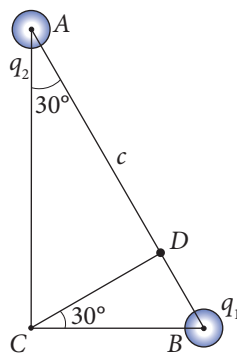


Fig. 4.18

Se dă:

$$m = 10^{-10} \text{ kg},$$

$$q = 10^{-6} \text{ C},$$

$$v_0 = 500 \text{ m/s},$$

$$U = 1\,000 \text{ V}$$

$$v = ?$$

Un fir de praf cu masa de 10^{-10} kg și sarcina $q = 10^{-6} \text{ C}$ pătrunde cu viteză de 500 m/s într-un câmp electric omogen și parcurge o diferență de potențial acceleratoare de $1\,000 \text{ V}$. Care este viteza firului de praf după accelerare?

Rezolvare

Conform teoremei despre variația energiei cinetice $L = E_{c2} - E_{c1}$, unde E_{c1} și E_{c2} sînt energiile cinetice ale firului de praf la intrarea sa în câmpul electric și, respectiv, la ieșire, după parcurgerea diferenței de potențial, iar L este lucrul efectuat la deplasarea firului de praf. Deoarece

$$E_{c1} = \frac{mv_0^2}{2}; E_{c2} = \frac{mv^2}{2}; L = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU,$$

avem:

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = qU,$$

de unde

$$v = \sqrt{v_0^2 + \frac{2q}{m}U}; v = 4\,500 \text{ m/s}.$$

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Cum se exprimă energia potențială a unei sarcini punctiforme aflate în câmp electrostatic prin potențialul electric?
2. Într-un punct al câmpului electrostatic potențialul este nul. Intensitatea câmpului electric în acest punct este tot nulă? Argumentați răspunsul, dînd exemple.
3. Care este semnificația fizică a diferenței de potențial (a tensiunii electrice)?
4. Într-o regiune a spațiului, potențialul electric rămîne constant. Ce se poate afirma referitor la intensitatea câmpului electric în această regiune?
5. Energia potențială a sarcinii de probă q_0 , situate într-un punct al câmpului electrostatic, este egală cu $2,5 \text{ mJ}$. Ce energie potențială posedă sarcina punctiformă egală cu $1,8 q_0$, introdusă în același punct al câmpului?
6. Lucrul câmpului electrostatic la deplasarea corpului punctiform electrizat cu sarcina de $3,6 \text{ mC}$ din punctul A în punctul B este egal cu $0,9 \text{ J}$. Să se determine potențialul electric în punctul A , dacă în punctul B potențialul este egal cu 180 V .
7. Intensitatea câmpului electric între două plăci metalice paralele este egală cu 500 V/m , iar distanța dintre ele – cu 10 cm . Ce viteză posedă la atingerea plăcii pozitive electronul ieșit din placa negativă cu viteză foarte mică?
8. În vîrfurile unui pătrat cu latura de 15 cm sînt fixate sarcinile punctiforme $q, 2q, 3q$ și $4q$, unde $q = 5 \text{ nC}$. Determinați potențialul câmpului electric în centrul pătratului.
9. Potențialul câmpului electrostatic generat de o sarcină punctiformă este egal cu 150 V la distanța de 10 cm de la sarcină. Care este valoarea potențialului electric la 25 cm de la sarcină?
10. Distanța dintre două sarcini punctiforme de semne opuse este egală cu 18 cm . Să se determine raportul dintre modulele sarcinilor, dacă se știe că în punctul situat pe segmentul dintre sarcini, la 12 cm de sarcina pozitivă, potențialul câmpului electric rezultat este nul.

11. Un electron parcurge o diferență de potențial acceleratoare de 100 V. Care este viteza obținută de electron în urma accelerării?

12.*În figura 4.19 sînt reprezentate, prin linii întrerupte, cîteva suprafețe echipotențiale, diferența de potențial pentru două suprafețe vecine fiind aceeași. Comparați valorile intensității cîmpului electric în punctele A și B. Argumentați răspunsul.

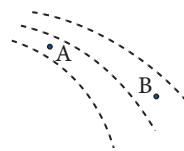


Fig. 4.19

4.4

CONDUCTOARELE ÎN CÎMP ELECTROSTATIC

Conductoare sînt numite substanțele care conțin sarcini electrice libere, adică particule încărcate, ce se pot deplasa liber în corp. În metale acestea sînt electronii de valență, care în procesul formării corpului din atomi îi părăsesc și devin comuni. Astfel, metalul este constituit din ioni pozitivi, situați în nodurile rețelei cristaline, și din electroni liberi. În lipsa cîmpurilor electrice exterioare, electronii liberi se mișcă haotic, asemenea moleculelor în gaze. Din această cauză ansamblul electronilor liberi din metale este numit și **gaz electronic**.

Comportarea specifică a conductoarelor la introducerea lor în cîmpul electrostatic este condiționată de prezența în ele a electronilor liberi.

Să cercetăm două plăci metalice paralele, situate aproape una de alta și încărcate cu sarcini electrice de valori egale, dar de semne opuse. Cîmpul electric dintre ele este un cîmp omogen, cu excepția regiunilor de la marginile plăcilor. În figura 4.20, a sînt indicate liniile de intensitate a cîmpului electric, iar cu linie întreruptă – regiunea cîmpului în care este introdus ulterior un corp metalic.

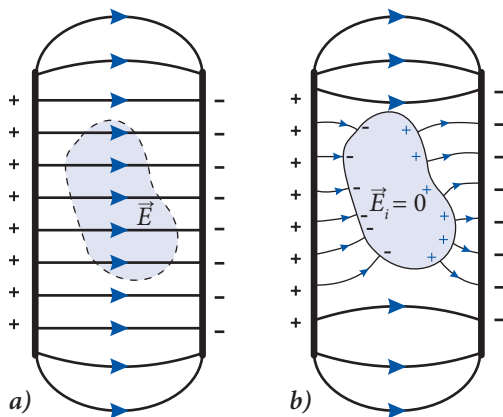


Fig. 4.20

La introducerea în cîmp a corpului conductor, asupra electronilor liberi din el acționează forța $\vec{F} = -e\vec{E}$, care le imprimă accelerație în sens opus vectorului \vec{E} . În consecință, suprafața conductorului, aflată în partea plăcii pozitive, se încarcă cu sarcină negativă. Simultan, la suprafața din partea opusă a conductorului rămîne un surplus de sarcină pozitivă (fig. 4.20, b). Semnalăm că sarcinile de semne opuse, apărute pe suprafața conductorului, generează un cîmp electric de sens opus cîmpului exterior. Astfel, intensitatea cîmpului electric din interiorul conductorului \vec{E} devine mai mică decît în exterior. Acest proces de deplasare a sarcinilor libere continuă pînă la momentul în care intensitatea cîmpului din interiorul conductorului devine nulă: $\vec{E}_i = 0$. Ulterior, încetează orice mișcare dirijată a sarcinilor libere ale conductorului – el trece în stare de **echilibru electric**. În această stare continuă doar mișcarea haotică a electronilor liberi.

Intensitatea cîmpului electric în interiorul conductorului aflat în cîmp electrostatic este nulă. În aceste condiții în regiunea interioară conductorul este neutru.

Echilibrul electric al sarcinilor se stabilește într-un interval de timp destul de scurt, datorită masei mici a electronului.

Să cercetăm câmpul electric în regiunea exterioară din vecinătatea imediată a conductorului. Dacă vectorul intensității \vec{E} ar avea componentă tangențială la suprafața conductorului, ar exista forțe tangențiale care ar deplasa electronii de-a lungul suprafeței. Dar în stare de echilibru electric, aceștia nu se pot mișca ordonat. Prin urmare, liniile de intensitate în vecinătatea exterioară imediată a suprafeței conductorului sînt normale la suprafața respectivă (fig. 4.20, b).

După cum se vede din figură, liniile de intensitate care pornesc de la placa pozitivă se termină pe sarcinile negative ale conductorului, în interiorul lui ele lipsesc, apoi pornesc de la sarcinile pozitive ale conductorului și se termină pe placa negativă.

Din relația (4.23) dintre intensitatea câmpului electric E și diferența de potențial $(\varphi_1 - \varphi_2)$, anume $E = (\varphi_1 - \varphi_2)/d$, și deoarece în interiorul conductorului $E_i = 0$, rezultă că $(\varphi_1 - \varphi_2) = 0$ pentru orice două puncte ale conductorului.

Potențialul electric este același în toate punctele conductorului aflat în câmp electrostatic.

Să analizăm alt caz: un conductor încărcat în absența câmpului exterior are surplus de sarcini de același semn. Or, astfel de sarcini se resping. Ele se îndepărtează unele de altele la distanțele cele mai mari posibile, adică se distribuie la suprafața conductorului, care în interior este neutru. Intensitatea câmpului electric în interiorul conductorului este nulă, iar în exterior, în vecinătatea imediată a suprafeței lui liniile de intensitate sînt normale la suprafață în punctele respective (fig. 4.21). În aceste condiții, potențialul electric are aceeași valoare în toate punctele conductorului.

Înlăturarea unei regiuni neutre din interiorul conductorului încărcat nu modifică câmpul electric al acestuia. Deci câmpul electric al unui conductor încărcat este determinat de sarcina sa electrică, de forma și dimensiunile sale și nu depinde de prezența în el a unor cavități interne.

În cazul unei sfere metalice electrizate, cu sau fără cavități în interior, câmpul electric din exterior este același, ca și cum toată sarcina electrică ar fi concentrată în centrul sferei.

Distribuirea sarcinilor electrice pe suprafața exterioară a conductorului poate fi demonstrată prin următorul experiment (fig. 4.22).

Pe o plasă metalică elastică, așezată pe piciorușe izolatoare, se fixează foițe fine de hîrtie. La electrizarea plasei se încarcă cu sarcini de același semn și foițele, fiind respinse de plasă. În cazul în care plasa este plană, foițele de pe ambele părți ale ei sînt respinse (fig. 4.22, a). Dacă din plasă este format un cilindru, se observă doar respingerea foițelor din partea exterioară a ei (fig. 4.22, b).

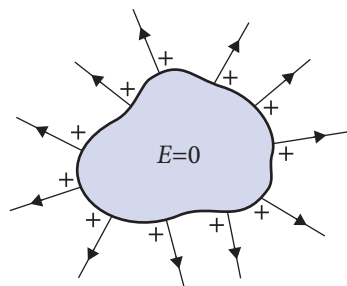


Fig. 4.21

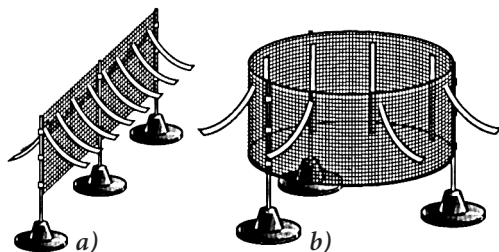


Fig. 4.22

Proprietatea conductoarelor de a nu permite pătrunderea câmpului electric în interiorul lor se aplică pentru a proteja dispozitivele sensibile de acțiunea câmpurilor electrice exterioare. Aceste dispozitive se izolează în interiorul unei cutii (sau plase) metalice, numită „cușca lui Faraday”.

Problemă rezolvată

Sarcina electrică a unei sfere metalice de rază R este egală cu q . Reprezentați graficele care exprimă intensitatea și potențialul câmpului electric al sferei în funcție de distanța r de la centrul ei.

Rezolvare

Intensitatea câmpului electric în interiorul sferei este nulă, în exterior fiind exprimată de formula (4.11) pentru intensitatea câmpului generat de o sarcină punctiformă. Avem:

$$E = \begin{cases} 0, & \text{pentru } r < R \\ \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}, & \text{pentru } r \geq R. \end{cases}$$

Potențialul electric în exteriorul sferei este dat de formula (4.24) pentru câmpul sarcinii punctiforme:

$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$ (pentru $r \geq R$). La suprafața sferei potențialul este egal cu $\varphi_R = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R}$.

Aceeași valoare potențialul o posedă în toate punctele din interiorul sferei. Astfel, potențialul electric al sferei încărcate:

$$\varphi = \begin{cases} \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R}, & \text{pentru } r \leq R \\ \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}, & \text{pentru } r \geq R. \end{cases}$$

Graficele respective sînt reprezentate în figura 4.23.

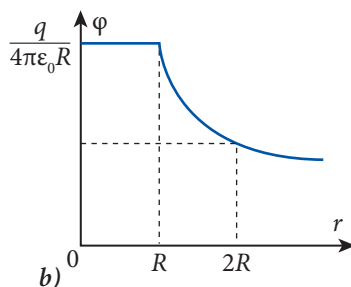
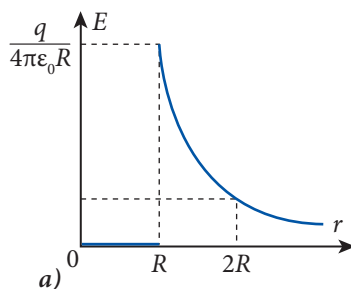


Fig. 4.23

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. În conductoare toți electronii sînt liberi?
2. Cum vă imaginați gazul electronic în metale?
3. Este posibilă mișcarea unor particule încărcate în interiorul unui conductor aflat în stare de echilibru electric?
4. Două conductoare metalice electrizate A și B au potențialele $\varphi_A > \varphi_B$. Care conductor cedează electroni în cazul în care ambele sînt puse în contact?
5. Două bile metalice identice, de rază R , sînt electrizate într-un caz cu sarcini de semne opuse $+q$ și $-q$, în alt caz cu sarcini de același semn $+q$ și $+q$. Comparați forțele de interacțiune dintre perechile de bile în cele două cazuri dacă distanța dintre centrele lor este egală cu: a) $3R$; b) $3\,000R$.
6. Pot să se atragă două corpuri metalice electrizate cu sarcini de același semn? Argumentați răspunsul.

Dielectrici sau izolatoare sînt numite substanțele care nu conțin particule încărcate libere, spre deosebire de conductoare, și sînt constituite din molecule neutre.

Pentru a cerceta comportarea dielectricilor în câmp electric exterior, să analizăm proprietățile electrice ale moleculelor neutre, determinate de modul de distribuție a sarcinilor electrice în ele. Aceste sarcini se pot deplasa numai în limitele moleculei, de aceea sînt numite **sarcini legate**.

Să analizăm un exemplu concret: molecula de apă (H_2O), care conține un atom de oxigen și doi atomi de hidrogen. Atomul de oxigen atrage electronii hidrogenului astfel încît regiunea în care se află oxigenul este încărcată negativ, iar cea în care se găsește hidrogenul – pozitiv (fig. 4.24, a). La moleculele de acest fel pot fi indicați polii electrici – pozitiv și negativ (fig. 4.24, b).

Moleculele în care centrul sarcinilor pozitive este deplasat față de centrul sarcinilor negative sînt numite molecule polare.

Alte exemple de molecule polare: CO – molecula oxidului de carbon, H_2S – molecula sulfurii de hidrogen ș.a.

De obicei, se utilizează un model al moleculelor la care centrele sarcinilor de semne opuse nu coincid. Acest model se numește **dipol electric**.

Dipol electric este sistemul de două sarcini punctiforme egale în modúl, de semne opuse, situate la o anumită distanță una de alta (fig. 4.24, c).

Distanța l dintre sarcinile dipolului este numită **braț al dipolului**, iar produsul dintre sarcină și braț – **moment dipolar** sau **moment electric**:

$$p_e = ql. \quad (4.25)$$

Introducînd brațul dipolului ca mărime vectorială, orientată de la sarcina negativă spre cea pozitivă, definim momentul dipolar ca mărime vectorială de același sens, de la sarcina negativă spre cea pozitivă (fig. 4.24, c):

$$\vec{p}_e = q\vec{l}. \quad (4.26)$$

Momentul dipolar este o caracteristică electrică a moleculelor și la moleculele polare este diferit de zero chiar în lipsa cîmpului electric exterior.

Există molecule în care sarcinile electrice sînt distribuite simetric, astfel încît centrul sarcinilor pozitive coincide cu centrul sarcinilor negative (fig. 4.26, a). Ele au moment dipolar nul și se numesc **molecule nepolare**. Molecule nepolare sînt moleculele gazelor inerte, ale oxigenului (O_2), ale azotului (N_2) ș.a.

Să analizăm comportarea moleculelor de ambele feluri într-un câmp omogen de intensitate \vec{E}_0 .

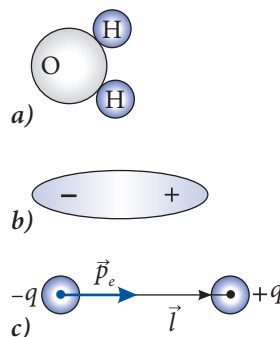


Fig. 4.24

Cercetăm mai întâi o moleculă polară (fig. 4.25). Asupra sarcinii pozitive acționează forța $\vec{F}_+ = q\vec{E}_0$ în sensul vectorului \vec{E} , iar asupra sarcinii negative – forța $\vec{F}_- = -q\vec{E}_0$ de sens opus. Forțele \vec{F}_+ și \vec{F}_- în modül sînt egale, iar rezultanta lor este nulă, deci nu pot produce mișcare de translație a moleculei. Ele rotesc molecula în sensul în care momentul dipolar ar lua direcția și sensul intensității cîmpului electric, adică au o acțiune de orientare.

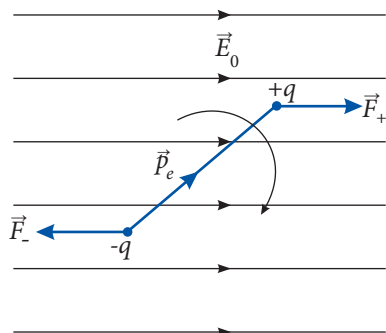


Fig. 4.25

Fie o moleculă nepolară în câmp electric. Forțele electrice influențează mișcarea sarcinilor din ea, astfel încît sarcinile pozitive și cele negative se deplasează în sensuri opuse, molecula deformîndu-se. Distribuția sarcinilor din moleculă nu mai este simetrică (fig. 4.26, b), molecula capătă moment dipolar de același sens cu vectorul intensității cîmpului \vec{E}_0 . Momentul dipolar în cazul de față crește odată cu mărirea intensității \vec{E}_0 și se numește **moment dipolar indus**.

Dielectricii constituiți din molecule polare au fost numiți **dielectrici polari**, respectiv, cei constituiți din molecule nepolare – **dielectrici nepolari**.

Să descriem proprietățile electrice ale dielectricilor, cunoscînd comportarea moleculelor în câmp electric.

Considerăm cîmpul electric omogen dintre două plăci paralele, de dimensiuni mari, încărcate cu sarcini electrice de semne opuse. Intensitatea cîmpului electric dintre plăci în vid este notată cu \vec{E}_0 .

Introducem un dielectric polar în cîmpul electric. Pînă la introducerea în cîmp, datorită mișcării termice, momentele dipolare erau orientate haotic. Cîmpul electric orientează moleculele astfel ca momentele dipolare să fie direcționate în sensul cîmpului. Această orientare este doar parțială, datorită mișcării termice care produce o acțiune cu caracter opus. Din figura 4.27, a se observă că în interior dielectricul polar rămîne neutru, dar la suprafețele lui se află sarcini electrice de semne opuse celor de pe plăcile din vecinătate.

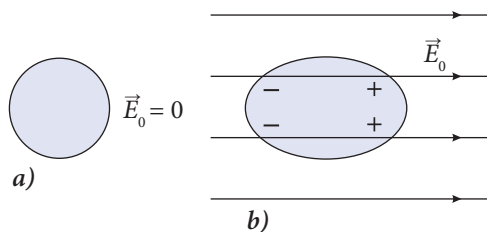


Fig. 4.26

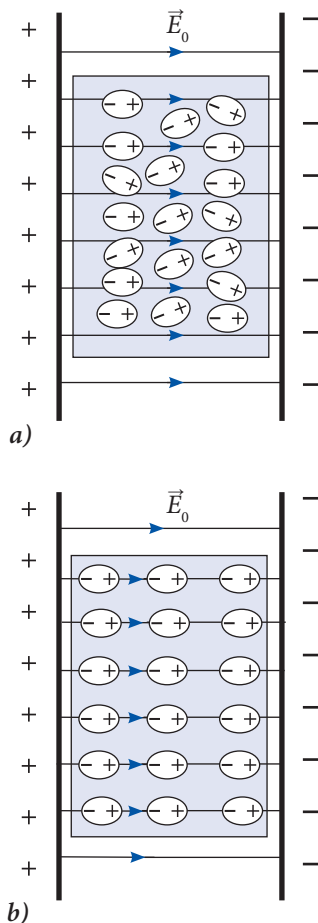


Fig. 4.27

La introducerea dielectricului nepolar, între plăcile electrizate moleculele lui capătă momente dipolare induse. Dielectricul în interior rămîne neutru, iar pe suprafețele lui, ca și în cazul precedent, apar sarcini legate (fig. 4.27, b).

Sub acțiunea cîmpului electric exterior momentele dipolare ale moleculelor dielectricului se orientează și pe suprafețele lui apar sarcini electrice legate. Acest fenomen se numește **polarizare a dielectricului**.

Reprezentăm situația obținută la polarizarea dielectricului în figura 4.28. Din figură se observă că sarcinile legate de pe suprafața dielectricului generează un cîmp electric interior de intensitate \vec{E}_i , avînd sens opus intensității \vec{E}_0 a cîmpului exterior. Intensitatea cîmpului electric în dielectric, în conformitate cu principiul superpoziției, este $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_i$. Valoarea ei $E = E_0 - E_i$. Prin urmare, intensitatea cîmpului electric în dielectric este mai mică decît în vid: $E < E_0$. Doar o parte din liniile de intensitate ale cîmpului generat de sarcinile de pe plăci pătrund în dielectric, celelalte avînd capetele pe sarcinile legate de pe suprafața lui (fig. 4.28).

Mărimea adimensională ϵ_r , care arată de cîte ori intensitatea cîmpului electric în dielectric este mai mică decît în vid, se numește **permitivitate relativă a dielectricului**

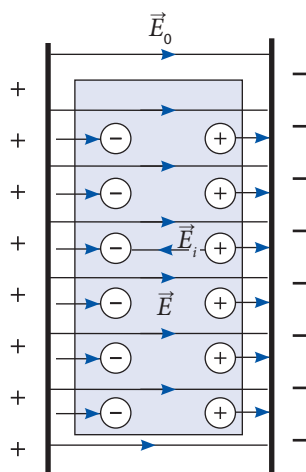


Fig. 4.28

$$\epsilon_r = \frac{E_0}{E}. \quad (4.27)$$

Evident, pentru vid $\epsilon_r = 1$.

Rezultă că intensitatea cîmpului electric în dielectric și intensitatea lui în vid sînt legate prin relația

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{\epsilon_r}. \quad (4.28)$$

În tabelul de mai jos sînt indicate valorile permitivității relative pentru cîțiva dielec-trici. Se observă că permitivitatea relativă a aerului diferă puțin de unitate. Respectiv, intensitatea cîmpului electric în aer este aproximativ egală cu cea în vid.

Materialul	Permitivitatea relativă, ϵ_r	Materialul	Permitivitatea relativă, ϵ_r
Vid	1,0000	Porțelan	4,44 – 6,8
Aer	1,0006	Sticlă de cuarț	5
Petrol lampant	2,1	Sticlă obișnuită	6,0 – 10,0
Parafină	2,2	Alcool etilic	25,8
Ulei de transformator	2,2	Glicerină	43
Chihlimbar	2,7	Apă	81

Să cercetăm o sarcină punctiformă q aflată într-un mediu dielectric. În baza celor expuse mai sus și a formulei (4.11) pentru intensitatea cîmpului electric în vid, obținem

expresia intensității câmpului electric generat de o sarcină punctiformă în dielectric:

$$E = k_e \frac{|q|}{\epsilon_r r^2} = \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^2}. \quad (4.29)$$

Conform relațiilor (4.22) și (4.28), diferența de potențial în mediul dielectric este de asemenea de ϵ_r ori mai mică decât în vid:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\varphi_{1,0} - \varphi_{2,0}}{\epsilon_r}, \quad (4.30)$$

unde $(\varphi_{1,0} - \varphi_{2,0})$ este diferența de potențial între aceleași puncte în lipsa dielectricului (în vid).

Aceeași afirmație se referă și la valoarea potențialului electric în dielectric.

Micșorarea de ϵ_r ori a intensității câmpului electric în mediul dielectric condiționează, de asemenea, micșorarea de ϵ_r ori a forței de interacțiune dintre două sarcini punctiforme q_1 și q_2 situate într-un astfel de mediu.

Expresia legii lui Coulomb ia forma:

$$F = k_e \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon_r r^2} = \frac{|q_1||q_2|}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^2}. \quad (4.31)$$

Aplicație. Să cercetăm un dipol în câmp electric neomogen, adică într-un câmp a cărui intensitate \vec{E} variază în spațiu. Asupra sarcinilor electrice ale dipolului, egale în mod, acționează din partea acestui câmp forțe diferite în mod: în regiunea câmpului cu intensitatea mai mare forța este mai mare. Prin urmare, în câmpul electric neomogen dipolul este nu numai orientat în direcția liniilor de intensitate, ci și atras în regiunea în care intensitatea câmpului este mai mare. În mod similar se comportă dielectricul introdus în câmp electric neomogen: el se polarizează și, simultan, este atras în regiunea spațiului în care intensitatea câmpului este mai mare.

Pe asemenea comportare a dielectricului în câmp electric neomogen se bazează funcționarea **filtrului electrostatic**, a cărui schemă este reprezentată în figura 4.29.

Acesta se folosește la îndepărtarea prafului de cărbune din gazele obținute în urma arderii. Partea electrică este constituită din doi electrozi (1 și 2), între care se creează o diferență mare de potențial (electrodul 1 se încarcă negativ, electrodul cilindric 2 – pozitiv). Densitatea liniilor de câmp, deci și intensitatea câmpului electric sînt mai mari lângă electrodul negativ (1). Gazele ce conțin praf de cărbune intră în filtru prin orificiul (3). Praful se polarizează și este atras spre electrodul negativ (1). Aici el captează electroni și este respins spre electrodul pozitiv (2), spre care este atras și pe care se depune. Astfel, prin orificiul (4) din filtru iese aer curățat. Atunci cînd masa prafului depus pe electrod devine mare, el cade sub acțiunea forței de greutate în vasul (5) din partea inferioară a filtrului, de unde periodic este evacuat.

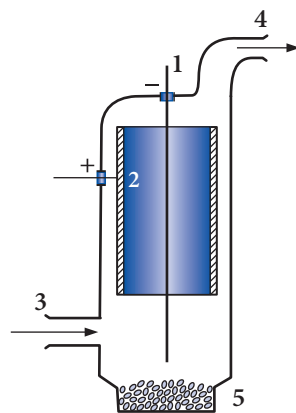


Fig. 4.29

Problemă rezolvată

Se dă:

$$2\alpha_a = 90^\circ,$$

$$2\alpha_u = 76^\circ,$$

$$\rho_0 = 2\,700\text{ kg/m}^3,$$

$$\rho = 800\text{ kg/m}^3$$

$$\epsilon_r = ?$$

Doă bile identice mici de aluminiu sînt suspendate de fire ușoare, izolatoare, de lungimi egale, capetele superioare ale cărora sînt fixate în același punct. Fiind electrizate, bilele aflate în aer se resping astfel încît firele de suspensie formează între ele un unghi de 90° . La introducerea completă a bilelor electrizate în ulei, unghiul dintre fire devine egal cu 76° . Să se determine permitivitatea relativă a acestui ulei. Se cunosc: densitatea aluminiului – $2\,700\text{ kg/m}^3$, densitatea uleiului – 800 kg/m^3 .

Rezolvare

Reprezentăm în figura 4.30, a sistemul de bile electrizate aflate în aer și forțele care acționează asupra unei bile: forța de greutate \vec{G} , forța de respingere electrică \vec{F}_{ea} și tensiunea \vec{T}_a a firului de suspensie. Bila se află în echilibru și rezultanta acestor forțe este nulă: $\vec{G}_a + \vec{F}_{ea} + \vec{T}_a = 0$.

Prin urmare, $\vec{G}_a + \vec{F}_{ea} = -\vec{T}_a$, adică diagonală paralelogramului construit pe vectorii \vec{G} și \vec{F}_{ea} are direcția firului de suspensie, deci formează cu verticala unghiul α_a . Aceasta ne permite să exprimăm forța electrică prin cea de greutate: $F_{ea} = G \cdot \operatorname{tg}\alpha_a$. Notînd cu V volumul bilei, pentru forța de greutate avem $G = \rho_0 Vg$, iar forța electrică $F_{ea} = \rho_0 Vg \cdot \operatorname{tg}\alpha_a$.

Considerăm cazul în care ambele bile se află în ulei (fig. 4.30, b). Asupra unei bile acționează forța de greutate \vec{G} , forța Arhimede \vec{F}_A , orientată vertical în sus, forța de respingere electrică \vec{F}_{eu} și tensiunea \vec{T}_u a firului de suspensie. Bila se află în echilibru, suma acestor forțe este nulă: $\vec{G} + \vec{F}_A + \vec{F}_{eu} + \vec{T}_u = 0$. Rezultanta forțelor verticale \vec{G} și \vec{F}_A este orientată vertical în jos și are modulul egal cu $(G - F_A)$.

Prin urmare, suma forțelor $(\vec{G} + \vec{F}_A)$ și \vec{F}_{eu} are sens opus tensiunii \vec{T}_u , formînd cu verticala unghiul α_u . După cum se vede din figură, forța electrică este $F_{eu} = (G - F_A)\operatorname{tg}\alpha_u$. Substituind valoarea forței de greutate și a forței Arhimede $F_A = \rho Vg$, obținem $F_{eu} = (\rho_0 - \rho)Vg \operatorname{tg}\alpha_u$.

Raportul dintre valorile forțelor de interacțiune electrică $\frac{F_{ea}}{F_{eu}} = \frac{\rho_0 \operatorname{tg}\alpha_a}{(\rho_0 - \rho) \operatorname{tg}\alpha_u}$. Dacă l este lungimea firului de suspensie, distanțele dintre bile sînt: $2l\sin\alpha_a$ în aer și $2l\sin\alpha_u$ în ulei. Forțele de interacțiune electrică au valorile $F_{ea} = \frac{k_e q^2}{4l^2 \sin^2 \alpha_a}$ și $F_{eu} = \frac{k_e q^2}{\epsilon_r \cdot 4l^2 \sin^2 \alpha_u}$.

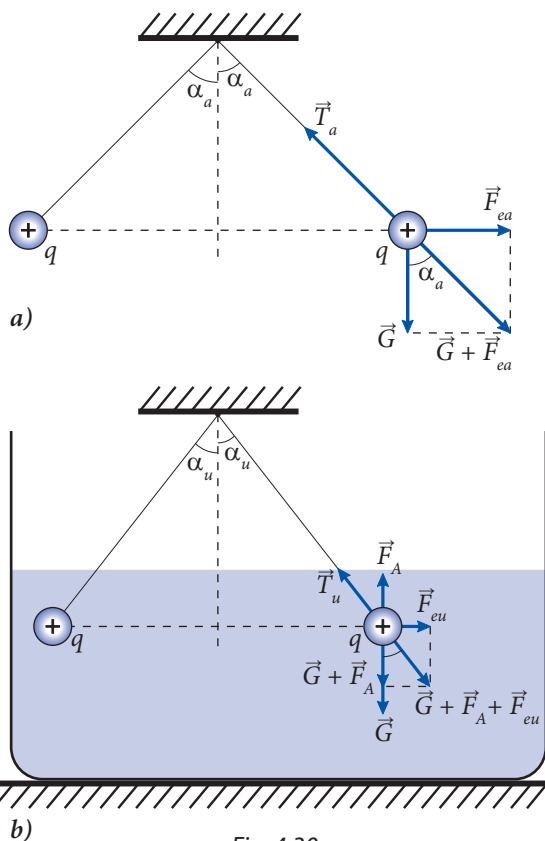


Fig. 4.30

Raportul lor $\frac{F_{ea}}{F_{eu}} = \frac{\epsilon_r \sin^2 \alpha_u}{\sin^2 \alpha_a}$.

Egalînd valorile obținute pentru raportul $\frac{F_{ea}}{F_{eu}}$, exprimăm permitivitatea relativă căutată:

$$\epsilon_r = \frac{\rho_0 \operatorname{tg} \alpha_a \cdot \sin^2 \alpha_a}{(\rho_0 - \rho) \operatorname{tg} \alpha_u \cdot \sin^2 \alpha_u}; \epsilon_r = 2,4.$$

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Care este deosebirea dintre comportarea moleculelor polare și a celor nepolare la introducerea lor în câmp electric?
2. Un dielectric polar se află în câmp electric exterior invariabil în timp. Cum se modifică valoarea intensității câmpului în dielectric la încălzirea acestuia?
3. La ce distanță de la un corp punctiform electrizat aflat în apă intensitatea câmpului electric este egală cu cea din aer la 0,18 m de la același corp?
4. Determinați distanța de la o sarcină punctiformă aflată în ulei, al cărei potențial electric are aceeași valoare ca și la distanța de 0,005 m de la sarcina aflată în apă. Se va considera permitivitatea relativă a uleiului egală cu 2,5.
5. Două sarcini punctiforme în ulei interacționează cu o forță de 0,84 N, iar în petrol lampant – cu o forță de 1,00 N, distanța dintre sarcini în ambele cazuri fiind aceeași. Să se determine permitivitatea relativă a petrolului lampant dacă pentru ulei ea este egală cu 2,5.
6. Forța de interacțiune dintre două sarcini electrice punctiforme aflate în aer este egală cu 8,6 mN. Care este valoarea forței de interacțiune dintre aceste sarcini introduse în glicerină dacă distanța dintre ele este micșorată de 4 ori?

4.6 CAPACITATEA ELECTRICĂ. CONDENSATOARELE

a. Capacitatea electrică a condensatorului

Pentru funcționarea normală a multor instalații din electrotehnică și radio-tehnică, este necesar să se acumuleze sarcini electrice care ulterior sînt utilizate. Dispozitivul care permite să se efectueze acumularea sarcinilor electrice este numit **condensator**.

Condensatorul reprezintă un sistem alcătuit din două conductoare (armături), separate printr-un dielectric, distanța dintre armături fiind mult mai mică decît dimensiunile lor liniare.

Dacă armăturile sînt legate la bornele unei surse de tensiune electrică, de exemplu ale unei mașini electrostatice, ele se încarcă cu sarcini electrice de semne opuse și egale în modîl: $+q$ și $-q$.

Valoarea sarcinii electrice de pe una din armături este numită sarcină a condensatorului.

Condensatorul poate fi, de asemenea, încărcat, legîndu-se una din armături la o bornă a sursei de tensiune electrică, iar cealaltă cu pămîntul. Ultima armătură se încarcă prin inducție electrostatică cu sarcină electrică preluată de la pămînt.

Liniile de intensitate ale câmpului electric sînt orientate de la armătura pozitivă spre cea negativă. Deoarece sarcinile electrice sînt egale în modúl, iar distanța dintre armături este mică, câmpul electric este concentrat în spațiul dintre armături.

În par. 4.3, *b* s-a menționat că liniile de intensitate ale câmpului electric sînt orientate în sensul în care potențialul electric descrește. Prin urmare, potențialul φ_1 al armăturii pozitive este mai mare decît potențialul φ_2 al armăturii negative.

Studiind câmpul electric al sarcinii punctiforme, s-a stabilit că intensitatea lui este direct proporțională cu valoarea sarcinii electrice q care creează acest câmp. Ținînd seama de relația (4.22) dintre diferența de potențial și intensitatea câmpului electric, putem afirma că și diferența de potențial în cazul câmpului din jurul unei sarcini punctiforme, în aceleași condiții, este direct proporțională cu valoarea acestei sarcini: $(\varphi_1 - \varphi_2) \sim q$. Afirmatia respectivă este valabilă și pentru condensator.

Trecînd la egalitate, scriem:

$$q = C (\varphi_1 - \varphi_2) \quad \text{sau} \quad q = CU, \quad (4.32)$$

unde $U = \varphi_1 - \varphi_2$ este tensiunea electrică dintre armături, iar mărimea C reprezintă un coeficient de proporționalitate numit **capacitate electrică a condensatorului**.

Capacitatea electrică a condensatorului din (4.32) este:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} \quad \text{sau} \quad C = \frac{q}{U}. \quad (4.33)$$

Capacitatea electrică a condensatorului este mărimea fizică egală cu raportul dintre sarcina condensatorului și tensiunea electrică dintre armăturile lui.

Unitatea de capacitate electrică:

$$[C] = \frac{[q]}{[U]} = \frac{C}{V} = F.$$

Unitatea de capacitate electrică în SI este **faradul** (F), denumire dată în cinstea ilustrului fizician englez Michael Faraday.

Faradul este capacitatea electrică a unui astfel de condensator la care diferența de potențial dintre armături este egală cu 1 V, atunci cînd sarcina condensatorului este egală cu 1C.

Deoarece faradul este o unitate foarte mare, în practică se folosesc submultipli lui:

microfaradul: $1 \mu F = 10^{-6} F$;

nanofaradul: $1 nF = 10^{-9} F$;

picofaradul: $1 pF = 10^{-12} F$.

Capacitatea electrică a condensatorului depinde de forma și dimensiunile armăturilor lui, de așezarea reciprocă a acestora și de proprietățile electrice ale dielectricului dintre armături. Mai jos vom justifica această afirmație pentru cazul unui condensator concret.

Să analizăm ultima dintre dependențele menționate, cercetînd un condensator între ale cărui armături este vid (aer). Notăm cu U_0 tensiunea electrică dintre armături, în cazul în care sarcina condensatorului este egală cu q . Capacitatea electrică a acestui condensator cu vid este:

$$C_0 = \frac{q}{U_0}.$$

La introducerea între armături a unui dielectric cu permitivitatea relativă ϵ_r la aceeași sarcină q , tensiunea electrică se micșorează de ϵ_r ori și devine egală cu

$$U = \frac{U_0}{\epsilon_r}.$$

Respectiv, capacitatea electrică a condensatorului cu dielectric este:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{q\epsilon_r}{U_0} = \epsilon_r C_0.$$

Prin urmare, la introducerea unui dielectric între armăturile condensatorului, capacitatea electrică a acestuia devine de ϵ_r ori mai mare decât cea a condensatorului cu vid (cu aer):

$$C = \epsilon_r C_0. \quad (4.34)$$

b. Capacitatea electrică a condensatorului plan

Condensatorul este numit plan dacă armăturile lui prezintă două plăci plane și paralele, separate de un dielectric.

Pentru a stabili dependența capacității electrice a condensatorului plan de parametrii acestuia, să realizăm un experiment (fig. 4.31).

I. Armătura A a condensatorului este legată la tija electrometrului, iar armătura B – la cutia lui. Condensatorul se încarcă de la mașina electrostatică, electrodul B aflându-se în poziția 1. Electrometrul indică tensiunea electrică dintre armături, acul lui aflându-se în poziția 1.

Modificăm distanța dintre armături. La micșorarea distanței (armătura B în poziția 2), tensiunea electrică dintre ele se micșorează. Sarcina electrică a condensatorului a rămas însă aceeași. Din definiția (4.33) rezultă că în acest caz capacitatea electrică a condensatorului crește. La majorarea distanței dintre armături (poziția 3 a armăturii B), tensiunea electrică se mărește, iar capacitatea electrică se micșorează. Astfel, capacitatea electrică C_0 a condensatorului plan cu aer este invers proporțională cu distanța dintre armături:

$$C_0 \sim 1/d.$$

II. Aducem armătura mobilă B în poziția 1. Deplasăm această armătură vertical, astfel ca să rămână în planul său. În acest caz aria suprafeței de suprapunere a armăturilor se micșorează. Electrometrul indică majorarea tensiunii, ceea ce corespunde reducerii capacității electrice a condensatorului. Prin urmare, capacitatea condensatorului este direct proporțională cu aria suprafeței de suprapunere a armăturilor:

$$C_0 \sim S.$$

Unind rezultatele de mai sus, obținem:

$$C_0 \sim \frac{S}{d}.$$

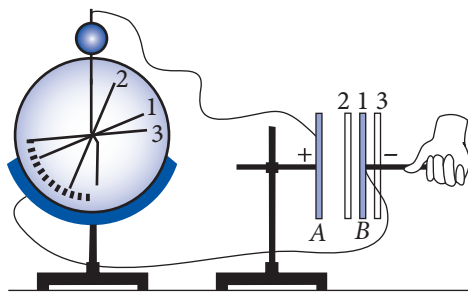


Fig. 4.31

După cum demonstrează calculele, coeficientul de proporționalitate în cazul condensatorului plan cu vid (cu aer) este egal cu constanta electrică ϵ_0 . Astfel, avem:

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{d}. \quad (4.35)$$

Substituind (4.35) în (4.34), obținem formula pentru capacitatea electrică a condensatorului plan, al cărui spațiu dintre armături este ocupat de un dielectric cu permitivitatea relativă ϵ_r :

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d}. \quad (4.36)$$

Deci capacitatea electrică a condensatorului plan depinde de dimensiunile armăturilor, de pozițiile reciproce ale acestora și de dielectricul dintre ele.

Caracterul dependenței (4.35) poate fi explicat relativ simplu. La o arie S mai mare a armăturilor, sarcinile electrice de pe fiecare din ele se distribuie la distanță mai mare și se resping mai slab. Așadar, condensatorul cu armături de arie mai mare acumulează mai multe sarcini electrice la aceeași tensiune electrică dintre armături și are o capacitate electrică mai mare.

Considerăm un condensator plan legat la o sursă de tensiune constantă. La distanțe d mai mici dintre armături sarcinile de semne opuse de pe ele se atrag mai puternic. Condensatorul la aceeași valoare a tensiunii acumulează mai multe sarcini, capacitatea electrică a lui fiind mai mare.

Din formula (4.35) exprimăm constanta electrică

$$\epsilon_0 = \frac{C_0 d}{S}.$$

De aici stabilim unitatea pentru ea:

$$[\epsilon_0] = \frac{[C_0][d]}{[S]} = \frac{\text{F} \cdot \text{m}}{\text{m}^2} = \frac{\text{F}}{\text{m}}.$$

Astfel, pentru constanta electrică ϵ_0 am obținut o unitate echivalentă cu cea stabilită mai sus (vezi *tabelul* de la par. 4.2).

Avem

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}.$$

O aplicare largă își găsesc condensatoarele cu hîrtie. Armăturile acestora sînt fișii de staniol, separate prin fișii mai late de hîrtie îmbibată cu parafină (*fig. 4.32*). O fișie de hîrtie identică acoperă una din armături, apoi fișiile sînt înfășurate pentru a se micșora dimensiunile spațiale ale condensatorului. Bobina astfel obținută este introdusă într-o cutie metalică destinată să protejeze condensatorul de leziuni mecanice. Din cutie se lasă la exterior doar două contacte pentru conectarea condensatorului în circuite electrice. Pe dispozitiv se marchează capacitatea electrică și valoarea tensiunii nominale. Condensatorul se utilizează numai la tensiuni ce nu o depășesc

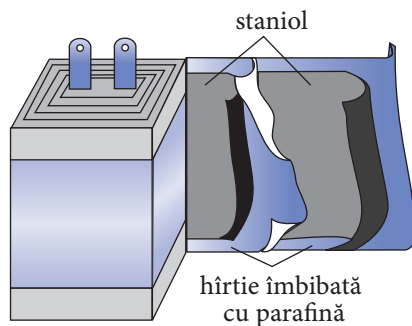


Fig. 4.32

pe cea nominală, care poate lua valori de pînă la cîteva zeci de kilovolți. La tensiuni mai mari decît cea nominală între armături se produce o descărcare electrică, o scînteie, care deteriorează dielectricul.

În radiotehnică se utilizează condensatoare a căror capacitate este variabilă. Ele reprezintă două sisteme de plăci metalice, izolate între ele. Un sistem de plăci este fix, al doilea se poate roti astfel încît suprafața comună a acestora variază (fig. 4.33).

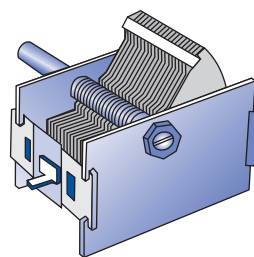


Fig. 4.33

În figura 4.34 sînt reprezentate simbolurile condensatoarelor: a) – cu capacitate constantă; b) – cu capacitate variabilă.

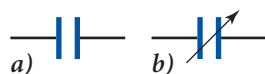


Fig. 4.34

c.* Gruparea condensatoarelor

În practică deseori sînt necesare valori ale capacităților electrice diferite de cele nominale ale capacităților condensatoarelor. Această situație implică formarea unor grupări (baterii) de condensatoare ce ar avea capacitățile solicitate.

Să analizăm, în continuare, cele mai simple moduri de grupare (**în paralel** și **în serie**) pentru a determina capacitatea condensatorului echivalent grupării respective.

Gruparea în paralel a condensatoarelor este reprezentată în figura 4.35. Observăm că diferența de potențial dintre bornele grupării și diferența de potențial dintre armăturile fiecărui condensator au aceeași valoare ($\varphi_A - \varphi_B$). Evident, sarcina grupării în paralel q_p este egală cu suma sarcinilor electrice ale condensatoarelor:

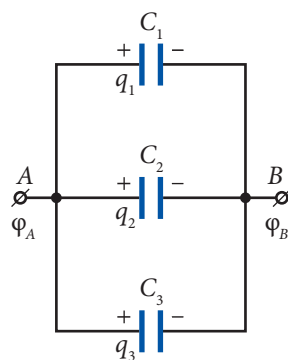


Fig. 4.35

$$q_p = q_1 + q_2 + q_3. \quad (4.37)$$

Conform relației (4.32), valorile sarcinilor electrice:

$$q_p = C_p(\varphi_A - \varphi_B); \quad q_1 = C_1(\varphi_A - \varphi_B); \quad q_2 = C_2(\varphi_A - \varphi_B); \quad q_3 = C_3(\varphi_A - \varphi_B).$$

Cu C_p este notată capacitatea electrică echivalentă a grupării în paralel a condensatoarelor. Substituind valorile de mai sus ale sarcinilor electrice în relația (4.37) și simplificînd prin diferența de potențial, obținem:

$$C_p = C_1 + C_2 + C_3. \quad (4.38)$$

Capacitatea electrică echivalentă a unei grupări în paralel de condensatoare este egală cu suma capacităților condensatoarelor din grupare.

Gruparea în serie a condensatoarelor este ilustrată în figura 4.36. La aplicarea unei diferențe de potențial ($\varphi_A - \varphi_B$) la bornele grupării condensatoarele se încarcă prin inducție electrostatică cu sarcini q egale între ele

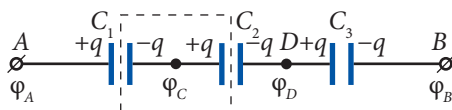


Fig. 4.36

(se consideră că înainte de formarea grupării condensatoarele erau descărcate). Armăturile a două condensatoare vecine și conductorul ce le leagă formează un conductor unic, a cărui sarcină totală este egală cu zero și toate punctele căruia au același potențial. De exemplu, armăturile și conductorul de legătură din interiorul cadrului format din linii întrerupte au potențialul egal cu φ_C și sarcina electrică egală cu $(-q + q) = 0$. Pentru diferența de potențial (tensiunea) dintre bornele grupării în serie avem:

$$\varphi_A - \varphi_B = (\varphi_A - \varphi_C) + (\varphi_C - \varphi_D) + (\varphi_D - \varphi_B), \quad (4.39)$$

adică tensiunea electrică dintre bornele grupării în serie este egală cu suma tensiunilor din grupare.

Notăm cu C_s capacitatea electrică a grupării. În conformitate cu definiția (4.33), avem:

$$\varphi_A - \varphi_B = \frac{q}{C_s}; \quad \varphi_A - \varphi_C = \frac{q}{C_1}; \quad \varphi_C - \varphi_D = \frac{q}{C_2} \quad \text{și} \quad \varphi_D - \varphi_B = \frac{q}{C_3}.$$

Substituind aceste valori în relația (4.39) și simplificînd prin sarcina q , obținem:

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}. \quad (4.40)$$

Mărima inversă a capacității electrice echivalente a grupării în serie de condensatoare este egală cu suma mărimilor inverse ale capacităților condensatoarelor din grupare.

Din formulele (4.38) și (4.40) se vede că la legarea în paralel capacitatea grupării este mai mare decît capacitatea electrică a fiecărui condensator, iar la legarea în serie, invers, capacitatea grupării este mai mică decît capacitatea fiecărui dintre condensatoarele grupării.

Există, de asemenea, și posibilitatea efectuării unor grupări mixte, în care unele condensatoare sînt grupate în paralel, iar altele – în serie.

d.* Capacitatea electrică a unui conductor izolat

Conductorul se consideră izolat dacă se află la distanțe foarte mari de la alte corpuri conductoare.

Expresia pentru capacitatea electrică a conductorului izolat poate fi obținută utilizîndu-se definiția (4.33) a capacității condensatorului. Considerăm că una din armăturile condensatorului, de exemplu cea încărcată cu sarcină negativă, este plasată la o distanță destul de mare, unde potențialul electric al cîmpului ei este foarte mic, efectiv nul: $\varphi_2 = 0$.

Pentru capacitatea electrică a conductorului izolat obținem:

$$C = \frac{q}{\varphi}. \quad (4.41)$$

Capacitatea electrică a conductorului izolat este egală cu raportul dintre sarcina acestui conductor și potențialul său electric.

Să calculăm capacitatea electrică a unei sfere conductoare de rază R . Cîmpul electric al sferei conductoare în exteriorul și la suprafața ei coincide cu cel creat de sarcina punctiformă, egală cu sarcina sferei și situată în centrul acesteia. Potențialul electric al sarcinii punctiforme la distanța R de aceasta se calculează după formula (4.24). Avem:

$$\varphi_0 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R}.$$

Substituind această expresie în definiția (4.41), obținem capacitatea electrică a sferei conductoare izolate, aflate în vid:

$$C_0 = 4\pi\epsilon_0 R. \quad (4.42)$$

Dacă sfera conductoare se află într-un mediu dielectric cu permitivitatea relativă ϵ_r , capacitatea electrică a ei, în conformitate cu relația (4.34), este:

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r R. \quad (4.43)$$

Să calculăm capacitatea electrică a Pământului, considerîndu-l o sferă conductoare de rază $R = 6400 \text{ km} = 6,4 \cdot 10^6 \text{ m}$. Din formula (4.42) obținem: $C_p \approx 7,1 \cdot 10^{-4} \text{ F} = 710 \mu\text{F}$. Ne convingem că conductoarele izolate au capacități electrice destul de mici.

Pentru comparație să calculăm dimensiunile armăturilor unui condensator plan a cărui capacitate electrică este egală cu cea a Pământului. Vom admite că distanța dintre armături $d = 1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$, iar spațiul dintre armături este umplut cu parafină ($\epsilon_r = 2,2$). Din formula (4.36) exprimăm aria armăturilor:

$$S = \frac{Cd}{\epsilon_0\epsilon_r}.$$

Efectuînd calculele, obținem: $S \approx 4000 \text{ m}^2$. Aceasta este aria unui pătrat cu latura de aproximativ 65 m, de circa 100 000 de ori mai mică decît raza Pământului.

Analiza acestui exemplu demonstrează prioritatea utilizării condensatoarelor față de conductoarele izolate în calitate de dispozitive destinate acumulării sarcinilor electrice.

Problemă rezolvată

1

Se dă:

$$S = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2,$$

$$d = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m},$$

$$\epsilon_r = 6,$$

$$U_0 = 9 \text{ V},$$

$$\text{a) } q = \text{const.},$$

$$\text{b) } U = \text{const.}$$

$$q, U, E - ?$$

Aria plăcilor unui condensator plan este egală cu 64 cm^2 , distanța dintre ele – cu $0,5 \text{ mm}$, iar permitivitatea relativă a dielectricului dintre plăci – cu 6 . Condensatorul este încărcat pînă la tensiunea de 9 V . Să se determine sarcina electrică, tensiunea și intensitatea cîmpului electric dintre plăci, dacă dielectricul este scos dintre plăcile condensatorului cînd acesta:

a) este deconectat de la sursa de tensiune;

b) rămîne conectat la sursa de tensiune.

Rezolvare

a) În cazul deconectării condensatorului de la sursa de tensiune, sarcina lui electrică nu se modifică. Capacitatea electrică a condensatorului cu dielectric $C_a = \epsilon_0\epsilon_r \frac{S}{d}$ și sarcina electrică a condensatorului legat la sursa de tensiune $q_a = C_a U_0 = \epsilon_0\epsilon_r \frac{S}{d} U_0$; $q_a = 6,12 \cdot 10^{-9} \text{ C} = 6,12 \text{ nC}$.

Această sarcină rămîne pe armăturile condensatorului și după îndepărtarea dielectricului, cînd capacitatea electrică se micșorează de ϵ_r ori. Dar micșorarea de ϵ_r ori a capacității condensatorului, în condițiile în care sarcina electrică rămîne aceeași, este însoțită de mărirea de ϵ_r ori a tensiunii dintre armături ($q = CU = \text{const.}$). Ea devine egală cu

$U_a = \epsilon_r U_0$, $U_a = 54 \text{ V}$. Intensitatea cîmpului electric în spațiul dintre armături $E_a = U_a/d$, $E_a = 1,08 \cdot 10^5 \text{ V/m} = 108 \text{ kV/m}$.

b) În cazul în care condensatorul rămîne legat la sursa de tensiune, valoarea tensiunii dintre armături nu se modifică: $U_b = U_0 = 9 \text{ V}$. Intensitatea cîmpului electric în interiorul condensatorului

$$E_b = \frac{U_b}{d}; E_b = 1,8 \cdot 10^4 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 18 \frac{\text{kV}}{\text{m}}.$$

Capacitatea electrică a condensatorului cu aer (după scoaterea din el a dielectricului)

$C_b = \epsilon_0 \frac{S}{d}$ și sarcina condensatorului

$$q_b = C_b U_b = \epsilon_0 \frac{S}{d} U_b; q_b = 1,02 \text{ nC}.$$

Problemă rezolvată

2

Se dă:

$$C_1 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ F},$$

$$C_2 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ F},$$

$$C_3 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ F},$$

$$C_4 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

$C - ?$

Condensatoarele din grupa reprezentată în figura 4.37 au capacitățile electrice $C_1 = 3 \mu\text{F}$, $C_2 = 2 \mu\text{F}$, $C_3 = 5 \mu\text{F}$ și $C_4 = 4 \mu\text{F}$. Să se calculeze capacitatea electrică echivalentă a grupării.

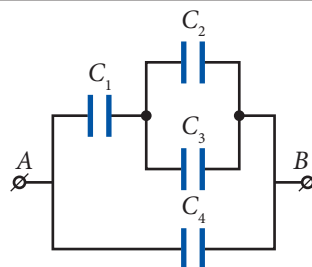


Fig. 4.37

Rezolvare

Problemele de acest gen se rezolvă începînd cu evidențierea unor elemente, în cazul de față condensatoare, care sînt legate numai în serie sau numai în paralel. Aplicînd regulile respective, aceste elemente sînt înlocuite cu unul singur, obținîndu-se o schemă echivalentă mai simplă. Procedul se repetă de mai multe ori pînă se reușește obținerea rezultatului scontat. Această metodă este numită a **transfigurării**. În gruparea din figura 4.37, condensatoarele C_2 și C_3 sînt legate în paralel, fiind echivalente cu un condensator, ce are capacitatea $C_{23} = C_2 + C_3$.

Se recomandă a folosi în calitate de indice al condensatorului echivalent totalitatea indicilor condensatoarelor pe care le substituie. Astfel, se obține schema echivalentă din figura 4.38, a. Condensatoarele care au capacitățile C_1 și C_{23} sînt legate în serie. Ele pot fi înlocuite cu un condensator a cărui capacitate electrică se determină din relația:

$$\frac{1}{C_{123}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_{23}}.$$

Obținem $C_{123} = \frac{C_1 \cdot C_{23}}{C_1 + C_{23}} = \frac{C_1(C_2 + C_3)}{C_1 + C_2 + C_3}$ și schema echivalentă din figura 4.38, b.

Capacitatea electrică echivalentă grupării de condensatoare din figura 4.37 este

$$C = C_{123} + C_4 = \frac{C_1(C_2 + C_3)}{C_1 + C_2 + C_3} + C_4;$$

$$C = 6,1 \cdot 10^{-6} \text{ F} = 6,1 \mu\text{F}.$$

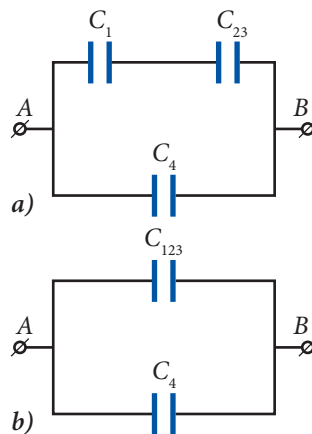


Fig. 4.38

Se dă:

$$C_0 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ F},$$

$$\epsilon_r = 2,1$$

$$C_a, C_b - ?$$

Capacitatea electrică a unui condensator plan cu aer este egală cu $4 \mu\text{F}$. Să se calculeze capacitatea electrică a condensatorului, dacă jumătate din volumul său se află în petrol lampant (permitivitatea relativă este egală cu 2,1). Să se examineze două cazuri (fig. 4.39):

a) plăcile condensatorului sînt verticale;

b) plăcile sînt horizontale.

Rezolvare

a) În situația reprezentată în figura 4.39, a, jumătatea de jos a condensatorului are în calitate de dielectric petrol lampant, iar cea de sus – aer. Conform formulei capacității electrice a condensatorului plan $C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}$, capacitatea electrică a unei jumătăți de condensator, aria armăturilor care este egală cu $S/2$, are valoarea de două ori mai mică. Prin urmare, jumătatea superioară a condensatorului are capacitatea $C_0/2$, cea inferioară – capacitatea $\epsilon_r C_0/2$. Aceste două jumătăți sînt legate în paralel, capacitatea totală a condensatorului este:

$$C_a = \frac{C_0}{2} + \epsilon_r \frac{C_0}{2} = \frac{(\epsilon_r + 1) C_0}{2}; C_a = 6,2 \cdot 10^{-6} \text{ F} = 6,2 \mu\text{F}.$$

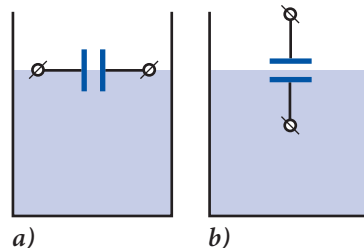


Fig. 4.39

b) Condensatorul din figura 4.39, b este echivalent cu un sistem de condensatoare legate în serie. Să ne imaginăm că suprafața lichidului din interiorul condensatorului este încărcată cu sarcinile $+q$ și $-q$, unde q este sarcina condensatorului. Aceste sarcini, împreună cu cele de pe plăcile condensatorului dat, sînt sarcinile a două condensatoare cu distanțele dintre plăci egale cu $d/2$, unde d este distanța dintre plăcile condensatorului inițial. În conformitate cu formula capacității condensatorului plan, condensatorul superior are capacitatea electrică egală cu $2C_0$, cel inferior – cu $2\epsilon_r C_0$. În cazul în care condensatoarele sînt legate în serie, capacitatea totală se determină din relația:

$$\frac{1}{C_b} = \frac{1}{2C_0} + \frac{1}{2\epsilon_r C_0} = \frac{\epsilon_r + 1}{2\epsilon_r C_0}. \text{ Obținem: } C_b = \frac{2\epsilon_r C_0}{\epsilon_r + 1}; C_b = 5,4 \cdot 10^{-6} \text{ F} = 5,4 \mu\text{F}.$$

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE¹

1. Ce reprezintă un condensator? Cum se definește capacitatea lui electrică?
2. Este justă afirmația: capacitatea electrică a condensatorului este direct proporțională cu sarcina acumulată și invers proporțională cu tensiunea electrică dintre armături? Argumentați răspunsul.
3. Ce factori determină capacitatea electrică a condensatorului? Argumentați răspunsul, folosind expresia pentru capacitatea condensatorului plan.
4. Cum se explică dependența capacității electrice a condensatorului de permitivitatea relativă a dielectricului dintre armături?

¹ La rezolvarea problemelor din cadrul acestei rubrici, valorile permisivităților relative ale dielectricilor se vor lua din tabelul de la par. 4.5.

5. Aria părții comune a plăcilor unui condensator cu capacitate electrică variabilă a fost micșorată de 1,5 ori. Cum s-a modificat capacitatea condensatorului?
- 6.* O sferă metalică cu pereți subțiri și o bilă metalică omogenă au raze egale. Ce puteți afirma referitor la valorile capacităților electrice ale acestor corpuri izolate?
7. Determinați capacitatea electrică a condensatorului, care, fiind conectat la o sursă de tensiune electrică de 12 V, acumulează o sarcină egală cu $8,4 \cdot 10^{-7}$ C.
8. Capacitatea electrică a unui condensator, avînd ca dielectric glicerina, este egală cu 645 pF. Care ar fi capacitatea acestui condensator dacă glicerina dintre armăturile lui ar fi înlocuită cu apă?
9. Un condensator, avînd în calitate de dielectric alcool etilic, a fost încărcat de la o sursă de tensiune electrică egală cu 215 V, apoi a fost deconectat de la aceasta. Care este tensiunea electrică dintre armăturile condensatorului după substituirea alcoolului etilic cu glicerina?
10. Care este capacitatea electrică a unui sistem de două plăci conductoare pătrate, ce au laturile egale cu cîte 12 cm, situate paralel una în fața alteia și separate de un strat de parafină cu grosimea de 1 mm? Stratul de parafină se atinge de ambele plăci. Calculați sarcinile electrice de pe plăcile conductoare la o diferență de potențial dintre ele egală cu 200 V.
11. Sarcina electrică a unui condensator plan cu aer este egală cu 26,55 nC, aria plăcilor lui – cu 100 cm^2 , iar distanța dintre ele – cu 0,5 mm. Care este diferența de potențial dintre armături?
- 12.* Capacitatea electrică a grupării în paralel a două condensatoare este egală cu 5,0 nF, iar a grupării în serie – cu 1,2 nF. Determinați capacitățile electrice ale condensatoarelor din grupări.
- 13.* Pentru funcționarea normală a unui dispozitiv electronic, este necesar un condensator a cărui capacitate electrică este egală cu 5,4 mF. Care trebuie să fie capacitatea unui alt condensator pentru ca, unit cu un condensator ce are capacitatea de 3,2 mF, să posedă capacitatea necesară? Cum trebuie să fie grupate aceste condensatoare?
- 14.* Capacitățile electrice ale condensatoarelor din montajul reprezentat în figura 4.40 sînt $C_1 = 3 \text{ }\mu\text{F}$, $C_2 = 7 \text{ }\mu\text{F}$, $C_3 = 6 \text{ }\mu\text{F}$ și $C_4 = 14 \text{ }\mu\text{F}$. Să se determine capacitatea echivalentă a grupării de condensatoare în cazul în care comutatorul K este: a) deschis; b) închis.
- 15.* Capacitatea electrică a unui condensator plan cu aer este egală cu 140 pF. În condensator se introduce o placă de porțelan ($\epsilon_r = 6$), paralel cu armăturile acestuia. Aria plăcii este egală cu aria armăturilor, grosimea ei – cu o jumătate a distanței dintre armături. Să se calculeze capacitatea electrică a condensatorului astfel obținut și să se demonstreze că această valoare nu depinde de poziția plăcii introduse (de distanța dintre ea și una din armături).
- 16.* O grupare din două condensatoare de capacități electrice egale cu 0,2 și 0,3 mF, legate în serie, este conectată la o sursă de tensiune electrică egală cu 9 V. Determinați sarcinile electrice ale condensatoarelor și tensiunile electrice dintre armăturile fiecărui condensator.
- 17.* Un condensator de capacitate electrică egală cu 72 pF este încărcat pînă la o tensiune electrică de 40 V. Condensatorul a fost deconectat de la sursa de tensiune, apoi armăturile lui au fost legate cu cele ale unui condensator descărcat. Să se determine capacitatea electrică a condensatorului al doilea, dacă între armăturile condensatoarelor legate s-a stabilit o tensiune electrică egală cu 24 V.

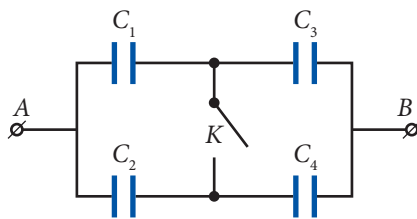


Fig. 4.40

Să ne imaginăm un condensator încărcat și deconectat de la sursa de tensiune electrică. Sarcinile electrice de pe armăturile lui au semne opuse și se atrag reciproc. Dacă una dintre armături este eliberată, ea se mișcă accelerat spre cealaltă armătură, deci cu viteză și energie cinetică crescînde. Această creștere a energiei cinetice poate avea loc numai în urma micșorării energiei condensatorului încărcat.

Să efectuăm un experiment, evidențiind factorii de care depinde energia condensatorului încărcat. Montăm în acest scop circuitul reprezentat în *figura 4.41*. În poziția 1 a comutatorului K condensatorul se încarcă pînă la tensiunea U . La trecerea comutatorului în poziția 2 se produce descărcarea condensatorului prin becul electric B – acesta emite un impuls de lumină. Energia condensatorului încărcat s-a consumat la încălzirea filamentului becului și la emisia luminii de acesta.

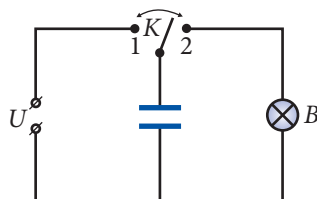


Fig. 4.41

Înlocuind condensatorul cu altul de o capacitate electrică mai mare, se constată că la aceeași tensiune dintre armături impulsul de lumină obținut este mai puternic. În cazul aceluiași condensator încărcat pînă la tensiuni diferite, se constată că impulsul de lumină este mai puternic la tensiuni mai mari. Astfel, experimentul demonstrează că energia condensatorului încărcat este mai mare, dacă este mai mare capacitatea lui și tensiunea electrică dintre armături.

Energia condensatorului încărcat se utilizează, de exemplu, pentru obținerea unor impulsuri puternice de lumină la aparatele de fotografiat.

Pentru a simplifica deducerea expresiei energiei condensatorului încărcat, examinăm un condensator plan. Să admitem că dimensiunile plăcilor lui sînt mult mai mari decît distanța dintre ele. În această aproximație, cîmpul electric dintre armături poate fi considerat omogen în tot volumul său, iar neomogenitatea lui de la marginile armăturilor poate fi neglijată.

Liniile de intensitate ale cîmpului sînt perpendiculare pe plăci, valoarea intensității lui fiind determinată de sarcina electrică a condensatorului. Placa 1 (*fig. 4.42*) este încărcată cu sarcină pozitivă. Vectorul intensității \vec{E}_1 al cîmpului creat de sarcina de pe ea este orientat de la placa 1, iar vectorul intensității \vec{E}_2 al cîmpului creat de sarcina negativă de pe placa 2 este direcționat spre această placă. Sarcinile în modül sînt egale, deci intensitățile cîmpurilor create de plăcile încărcate au valori egale: $|\vec{E}_1| = |\vec{E}_2|$. În conformitate cu principiul superpoziției, intensitatea cîmpului electric rezultat $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$. În spațiul dintre plăci vectorii \vec{E}_1 și \vec{E}_2 au același sens, prin urmare, $E = E_1 + E_2 = 2E_1$. În spațiul din exteriorul

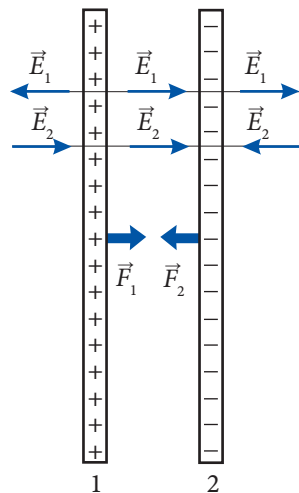


Fig. 4.42

plăcilor vectorii \vec{E}_1 și \vec{E}_2 au sensuri opuse, deci intensitatea câmpului rezultat este nulă. Astfel, câmpul electric al unui condensator încărcat este concentrat în spațiul dintre armăturile lui.

Să calculăm forța de atracție care acționează asupra unei plăci a condensatorului. Sarcina acesteia q se află în câmpul electric creat de sarcina de pe cealaltă placă. Intensitatea acestui câmp $E_1 = E/2$, deci în conformitate cu relația (4.10), forța care acționează asupra unei plăci are valoarea: $F_1 = F_2 = qE_1 = qE/2$.

Câmpul electric dintre plăci este omogen; prin urmare, valoarea acestei forțe nu depinde de distanța dintre plăci, dacă aceasta rămîne mult mai mică decît dimensiunile liniare ale plăcilor.

Încărcarea condensatorului constă în separarea sarcinilor electrice – sarcinile de un semn sînt deplasate de pe o placă pe alta, acestea încărcîndu-se cu sarcini de semne opuse și egale în modûl.

În figura 4.43 este prezentată o modalitate imaginară de încărcare a condensatorului: în stare inițială plăcile se ating una de alta, iar pe suprafața lor de contact se află sarcinile $+q$ și $-q$, adică o sarcină nulă (în figură placa 2 în poziție inițială este reprezentată prin linii întrerupte). Condensatorul încărcat se obține prin separarea plăcilor.

Energia condensatorului încărcat este egală cu lucrul consumat din exterior la îndepărtarea plăcilor una de alta, după cum energia potențială a corpului aflat la o înălțime deasupra Pămîntului este egală cu lucrul mecanic consumat la ridicarea lui. Avem $W_p = L_{cons.}$. La mișcarea uniformă a plăcii forța $F = F_1$. Lucrul consumat la îndepărtarea plăcilor la distanța d este:

$$L_{cons.} = Fd = q \frac{E}{2} d.$$

Conform relațiilor (4.18) și (4.23), produsul $Ed = U$ reprezintă tensiunea dintre armăturile condensatorului. Astfel, lucrul consumat:

$$L_{cons.} = \frac{1}{2} qU.$$

Prin urmare, energia condensatorului încărcat:

$$W_p = \frac{1}{2} qU. \quad (4.44)$$

Aceasta este energia potențială, deoarece, după cum s-a văzut mai sus, depinde de poziția reciprocă a plăcilor.

Folosind definiția capacității electrice (4.33), expresia (4.44) poate fi scrisă și în alte forme:

$$W_p = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}. \quad (4.45)$$

Se poate demonstra că expresiile obținute pentru energia condensatorului plan sînt valabile pentru condensatoare de orice formă.

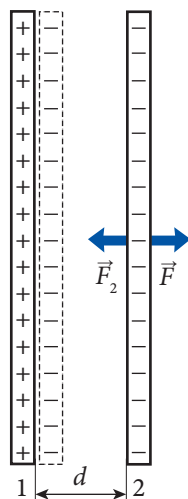


Fig. 4.43

Să revenim la formula pentru energie (4.45). Substituim expresia (4.36) pentru capacitatea electrică a condensatorului plan și relația $U = Ed$. Obținem:

$$W_p = \frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} (Ed)^2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r E^2}{2} \cdot Sd.$$

Produsul $Sd = V$ este volumul spațiului dintre plăcile condensatorului, ocupat de câmpul electric. Astfel:

$$W_p = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r E^2}{2} \cdot V. \quad (4.46)$$

Energia condensatorului încărcat este localizată în spațiul dintre plăci, în care este concentrat câmpul electric.

Împărțind energia condensatorului W_p la volum, obținem energia ce revine unei unități de volum a câmpului electric, numită **densitate volumică a energiei câmpului electric**:

$$w_e = \frac{W_p}{V} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r E^2}{2}. \quad (4.47)$$

Densitatea energiei câmpului electric este proporțională cu pătratul intensității câmpului electric.

Problemă rezolvată*

1

Se dă:

$$C_1 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ F},$$

$$C_2 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ F},$$

$$U_1 = 9 \text{ V},$$

$$U_2 = 4 \text{ V}$$

$$\Delta W = ?$$

Două condensatoare, avînd capacitățile electrice egale cu $1 \mu\text{F}$ și $4 \mu\text{F}$, sînt conectate la surse de tensiune electrică de 9 V și, respectiv, 4 V . Să se determine variația energiei sistemului de condensatoare după deconectarea lor de la sursele de tensiune și legarea în paralel a armăturilor încărcate cu sarcini electrice:

a) de același semn;

b) de semne opuse.

Analizați rezultatele obținute.

Rezolvare

Sarcinile electrice ale condensatoarelor încărcate nu se modifică la deconectarea acestora de la sursele de tensiune electrică și sînt egale cu $q_1 = C_1 U_1$ și $q_2 = C_2 U_2$. La conectarea între ele a armăturilor celor două condensatoare se obține o grupare în paralel, a cărei capacitate electrică $C = C_1 + C_2$.

Examinăm cazul a). La conectarea între ele a armăturilor cu sarcini electrice de aceleași semne sarcina totală a grupării $q_a = q_1 + q_2$, în conformitate cu legea conservării sarcinii electrice. Tensiunea dintre armături:

$$U_a = \frac{q_a}{C} = \frac{q_1 + q_2}{C_1 + C_2} = \frac{C_1 U_1 + C_2 U_2}{C_1 + C_2}.$$

Energia condensatoarelor încărcate înainte de gruparea lor: $W_1 = \frac{C_1 U_1^2}{2} + \frac{C_2 U_2^2}{2}$, iar după formarea grupării:

$$W_{a2} = \frac{C U_a^2}{2} = \frac{(C_1 U_1 + C_2 U_2)^2}{2(C_1 + C_2)}.$$

Variația energiei sistemului de condensatoare:

$$\Delta W_a = W_{a2} - W_1 = -\frac{C_1 C_2 (U_1 - U_2)^2}{2(C_1 + C_2)}; \Delta W_a = -10^{-5} \text{ J}.$$

Problema se rezolvă similar în cazul **b)**, în care se conectează între ele armăturile încărcate cu sarcini de semne opuse. Sarcina electrică a grupării de condensatoare

$$q_b = |q_1 - q_2| = |C_1 U_1 - C_2 U_2|.$$

Pentru variația energiei sistemului de condensatoare se obține:

$$\Delta W_b = -\frac{C_1 C_2 (U_1 + U_2)^2}{2(C_1 + C_2)}; \Delta W_b = -5,76 \cdot 10^{-5} \text{ J}.$$

Se observă că energia finală în ambele cazuri este mai mică decât cea inițială, diferența fiind transformată în alte forme de energie. Diferența este mai mare la conectarea armăturilor de semne opuse, când se produc scînteii (descărcări electrice).

Problemă rezolvată* 2

Se dă:	SI:
$w = 5 \text{ J/m}^3$,	
$S = 10 \text{ cm}^2$	10^{-3} m^2
$F = ?$	N

Densitatea volumică de energie a câmpului electric concentrat între armăturile unui condensator plan este egală cu 5 J/m^3 . Cu ce forță se atrag armăturile condensatorului, dacă aria suprafeței lor comune este de 10 cm^2 ?

Rezolvare

În conformitate cu (4.47), densitatea volumică de energie a câmpului electric din interiorul condensatorului

$$w = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E^2,$$

unde $E = F/q$ reprezintă intensitatea câmpului electric, F este forța de atracție dintre armături, iar q – sarcina electrică a condensatorului.

Din relațiile (4.33) și (4.36) pentru capacitatea condensatorului plan și (4.22), avem:

$$\frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} = \frac{q}{Ed},$$

de unde

$$\epsilon_0 \epsilon_r E = \frac{q}{S}.$$

Astfel, pentru densitatea volumică de energie obținem:

$$w = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E \cdot E = \frac{1}{2} \cdot \frac{q}{S} \cdot \frac{F}{q} = \frac{F}{2S}$$

și forța de atracție dintre armăturile condensatorului

$$F = 2Sw; F = 10 \text{ mN}.$$

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Ce factori determină energia unui condensator încărcat?
2. Ce pericol poate prezenta circuitul electric care conține condensatoare după deconectarea lui de la sursa de tensiune electrică? Cum trebuie să se procedeze pentru a-l evita?

3. Intensitatea cîmpului electric dintre armăturile unui condensator plan s-a majorat de 3 ori. De cîte ori s-a modificat energia condensatorului?
4. Care este tensiunea aplicată armăturilor unui condensator de capacitate electrică egală cu 30 pF, dacă energia înmagazinată este egală cu $2,4 \cdot 10^{-8}$ J?
5. Distanța dintre plăcile unui condensator plan încărcat este micșorată de două ori. Cum variază energia înmagazinată în cazul în care condensatorul: a) este conectat la sursa de tensiune electrică; b) este deconectat de la sursă?
6. Un condensator plan cu aer este conectat la o sursă de tensiune electrică. Energia condensatorului încărcat este egală cu $1,5 \cdot 10^{-7}$ J. Care este variația energiei condensatorului la micșorarea distanței dintre armăturile lui de 4 ori?
- 7.* Două condensatoare avînd capacitățile electrice egale cu 40 nF și 24 nF sînt legate în serie. Să se calculeze energia acumulată de fiecare condensator, dacă tensiunea electrică aplicată grupării de condensatoare este egală cu 32 V.
- 8.* Două condensatoare cu aer, identice, sînt unite în serie și conectate la o sursă de tensiune electrică. Energia înmagazinată de gruparea de condensatoare este egală cu $2,5 \cdot 10^{-7}$ J. Care este energia grupării după ce spațiul dintre armăturile unuia din ele a fost umplut cu dielectric a cărui permitivitate relativă este egală cu 4?
- 9.* O bilă mică încărcată cu sarcina electrică $q = 8 \mu\text{C}$ se află în ulei. Care este densitatea volumică de energie a cîmpului creat de bilă în punctele situate la distanța de 10 cm de la centrul ei? Permitivitatea relativă a uleiului $\epsilon_r = 2,2$.

4.8*

MIȘCAREA PARTICULELOR ÎNCĂRCATE ÎN CÎMP ELECTRIC OMAGEN

Funcționarea multor dispozitive electronice este condiționată de mișcarea în ele, în mod anume, a unor particule încărcate. Este important să cunoaștem cum se mișcă acestea în cîmpuri electrice, cum poate fi dirijată mișcarea lor. Admitem că particulele încărcate se mișcă în spații vidate, pentru a exclude ciocnirile lor cu particulele de substanță, care le-ar modifica mișcarea.

Să cercetăm mișcarea particulelor încărcate în cîmp electric omogen, adică într-un cîmp, în care vectorul intensității \vec{E} în puncte diferite ale spațiului este același. Prin urmare, forța electrică $\vec{F} = q\vec{E}$, care acționează asupra particulei de sarcină q și masă m , precum și accelerația imprimată acestuia:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{q}{m} \vec{E} \quad (4.48)$$

în timpul mișcării rămîn constante.

În cazul particulelor încărcate cu sarcină electrică pozitivă ($q > 0$), forța \vec{F} și accelerația \vec{a} sînt orientate în sensul vectorului \vec{E} , iar în cazul particulei încărcate cu sarcină electrică negativă ($q < 0$), vectorii \vec{F} și \vec{a} au sens opus vectorului \vec{E} .

Să calculăm valoarea accelerației (4.48) în cazul protonului ($q_p = +e = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{C}$, $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}\text{kg}$) aflat într-un cîmp electric de o intensitate relativ mică: $E = 100\text{ V/m}$. Se obține $a = 9,57 \cdot 10^9\text{ m/s}^2$. Observăm că această valoare este aproximativ de 10^9 (un miliard) de ori mai mare decît accelerația gravitațională $g = 9,81\text{ m/s}^2$. Tot de atîtea ori este mai mare decît forța de greutate a acestuia și forța electrică care acționează asupra protonului. Prin urmare, cercetînd mișcarea protonului în cîmpuri electrice, putem ține cont numai de forța electrică, neglijînd forța sa de greutate. Cu atît mai

justificată este neglijarea forței de greutate a electronului, a cărui sarcină electrică în modül este egală cu cea a protonului, dar a cărui masă este de circa 1 840 ori mai mică decât cea a protonului.

Așadar, mișcarea particulelor încărcate (protoni, electroni) în câmp electric omogen este o mișcare cu accelerația constantă (4.48), fiind similară cu mișcarea corpului în câmp gravitațional omogen (vezi *Fizica, cl. a X-a*, par. 1.9).

Să analizăm câteva cazuri concrete. În primul rînd, vom considera cazuri în care particula încărcată pătrunde în câmp electric omogen, avînd viteza \vec{v}_0 orientată de-a lungul liniei de intensitate.

Problemă rezolvată 1

Un proton intră într-un câmp electric omogen de intensitate \vec{E} , avînd vectorul vitezei \vec{v}_0 de aceeași direcție și sens cu vectorul \vec{E} . Să se determine viteza protonului la momentul cînd acesta a parcurs o distanță egală cu s .

Rezolvare

Reprezentăm în *figura 4.44* situația descrisă în problemă. Axa Oy este orientată în sensul intensității și are originea în punctul în care protonul a pătruns în câmp. Sarcina electrică a protonului este pozitivă, deci accelerația are același sens cu axa Oy . Prin urmare, proiecțiile vitezei și accelerației protonului sînt:

$$v_{oy} = v_0, v_y = v \text{ și } a_y = a = eE/m_p.$$

Mișcarea protonului este o mișcare rectilinie uniform accelerată, cum este și mișcarea corpului aruncat vertical în jos în câmpul gravitațional al Pămîntului.

Viteza căutată poate fi determinată pornind de la formulele mișcării uniform accelerate pentru coordonată și proiecția vitezei în funcție de timp. Rezolvarea este mai simplă dacă folosim formula lui Galilei:

$$v_y^2 - v_{oy}^2 = 2a_y s.$$

Substituind mărimile respective, obținem viteza căutată:

$$v = \sqrt{v_0^2 + \frac{2eEs}{m_p}}.$$

Produsul $Es = U$ este tensiunea electrică dintre punctele între care s-a deplasat protonul. Expresia de mai sus ia forma:

$$v = \sqrt{v_0^2 + \frac{2eU}{m_p}}.$$

În cazul în care viteza inițială este relativ mică și poate fi neglijată, avem:

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m_p}}.$$

Același rezultat poate fi obținut și din considerente energetice: se egalează variația energiei cinetice a protonului

$$W_c - W_{co} = \frac{m_p v^2}{2} - \frac{m_p v_0^2}{2}$$

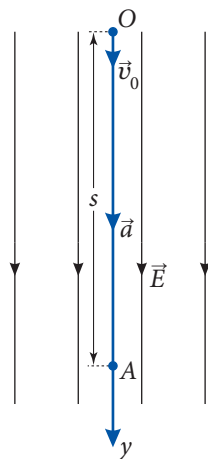


Fig. 4.44

cu lucrul efectuat de câmpul electric la deplasarea protonului pe distanța s exprimată de relația:

$$L = qEs = eU.$$

Situația analizată în această problemă este caracteristică pentru diverse instalații în care sînt accelerate particulele încărcate; în cazul dat tensiunea U este numită **tensiune (diferență de potențial) acceleratoare**.

Problemă rezolvată

2

Un electron pătrunde cu viteză v_0 în spațiul dintre plăcile unui condensator plan prin orificiul O din placa încărcată cu sarcină electrică pozitivă (fig. 4.45). Tensiunea electrică dintre plăci este egală cu U , distanța dintre ele – cu d . Să se determine:

- timpul pînă la oprire (măsurat de la momentul pătrunderii în condensator);
- distanța parcursă pînă la oprire;
- în ce condiții electronul se oprește între plăci;
- durata mișcării electronului în interiorul condensatorului.

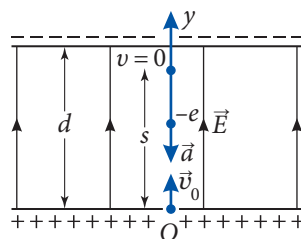


Fig. 4.45

Rezolvare

a) Orientăm axa Oy ca în figură. Sarcina electronului este negativă ($q_e = -e$), deci accelerația lui (4.48) are sens opus vitezei inițiale. Avem:

$$v_{0y} = v_0 \text{ și } a_y = -\frac{e}{m_e}E. \text{ Dar } E = \frac{U}{d}, \text{ prin urmare, } a_y = -\frac{eU}{m_e d}.$$

După intrarea în spațiul dintre armături, mișcarea electronului este uniform încetinită. La un moment el se oprește, apoi se deplasează uniform accelerat în sens opus axei Oy . Mișcarea electronului este similară celei a corpului aruncat vertical în sus în câmp gravitațional omogen. Pentru proiecția vitezei electronului pe axa Oy , avem $v_y = v_{0y} + a_y t$.

În acest caz:

$$v_y = v_0 - \frac{eU}{m_e d} t.$$

La momentul opririi, viteza $v_y = 0$. Pentru durata mișcării electronului în condensator pînă la oprire, avem:

$$t_1 = \frac{m_e v_0 d}{eU}.$$

b) Substituind acest timp în expresia pentru coordonată $y = v_0 t + \frac{a_y t^2}{2}$, care ia forma $y = v_0 t_1 - \frac{eU}{2m_e d} t_1^2$, obținem distanța s parcursă de electron între armăturile condensatorului pînă la oprire $s = \frac{m_e v_0^2}{2eU} d$. Aceeași valoare pentru s se capătă dacă folosim formula lui Galilei sau reieșim din considerente energetice.

c) Electronul se oprește între plăci, adică $s < d$. Ținînd seama de expresia pentru distanța s , obținem condiția:

$$\frac{m_e v_0^2}{2} < eU.$$

Electronul se oprește în spațiul dintre plăci, dacă energia sa cinetică $\frac{m_e v_0^2}{2}$ la momentul intrării între ele este insuficientă pentru efectuarea lucrului necesar să ajungă la placa negativă, care îl respinge.

d) Durata de la momentul opririi electronului pînă la ieșirea din condensator este, de asemenea, egală cu t_1 . Aceasta se demonstrează din condiția $y = 0$, ca în cazul demonstrării că durata coborîrii corpului aruncat vertical în sus este egală cu timpul urcării. Astfel, electronul se află între armăturile condensatorului pe parcursul intervalului de timp:

$$t = 2t_1 = \frac{2m_e v_0 d}{eU}.$$

Să analizăm o problemă în care viteza inițială v_0 a particulei încărcate este perpendiculară pe vectorul \vec{E} al intensității cîmpului electric omogen. În problemele de acest tip se neglijează neomogenitatea cîmpului la marginile condensatorului.

Problemă rezolvată 3

Un electron intră în spațiul dintre plăcile unui condensator plan avînd viteza v_0 , paralelă cu plăcile. Lungimea plăcilor în direcția vitezei v_0 este egală cu l , distanța dintre plăci – cu d , tensiunea electrică dintre ele – cu U . Să se determine:

- deviația electronului la ieșirea din condensator de la direcția vitezei inițiale;
- energia cinetică a electronului la ieșirea din condensator;
- unghiul format de viteza electronului la ieșirea din condensator cu direcția vitezei inițiale.

Rezolvare

a) Reprezentăm în *figura 4.46* situația descrisă în problemă. Se ia sistemul de coordonate cu originea O în punctul în care electronul intră în cîmp, cu axa Ox orientată de-a lungul vectorului v_0 și cu axa Oy în sensul accelerației electronului.

Proiecțiile accelerației pe axe de coordonate sînt:

$$a_x = 0, a_y = \frac{eU}{m_e d}.$$

Prin urmare, mișcarea electronului poate fi descompusă în două mișcări rectilinii: uniformă de-a lungul axei Ox și uniform accelerată de-a lungul axei Oy . Această mișcare este similară mișcării corpului aruncat orizontal în cîmp gravitațional omogen.

Prin analogie, scriem ecuațiile pentru:

proiecțiile vitezei $v_x = v_0$, $v_y = \frac{eU}{m_e d} t$; coordonate $x = v_0 t$, $y = \frac{eU}{2m_e d} t^2$.

Timpul t_1 al mișcării electronului în condensator se obține din condiția $x = l$. Rezultă $t_1 = \frac{l}{v_0}$. Deviația y_1 a electronului este egală cu valoarea coordonatei y la momentul t_1 .

Se obține:

$$y_1 = \frac{eUl^2}{2m_e v_0^2 d}.$$

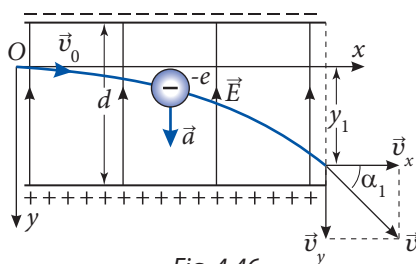


Fig. 4.46

b) Energia cinetică a electronului $W_c = \frac{m_e}{2}(v_x^2 + v_y^2)$. La momentul t_1 ea este:

$$W_c = \frac{m_e}{2} \left[v_0^2 + \left[\frac{eUl}{m_e v_0 d} \right]^2 \right].$$

c) După cum reiese din figură, $\tan \alpha = \frac{v_y}{v_x}$. La momentul t_1 avem:

$$\tan \alpha_1 = \frac{eUl}{m_e v_0^2 d}.$$

Dacă viteza inițială a particulei formează un unghi arbitrar cu vectorul intensității \vec{E} a câmpului electric omogen, ea se va mișca pe o traiectorie parabolică. Mișcarea ei este identică mișcării corpului aruncat sub un unghi α față de orizontală în câmp gravitațional omogen (în ultima problemă rezolvată traiectoria electronului reprezintă o porțiune a parabolei cu vârful în originea coordonatelor O).

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

- În ce condiții traiectoria particulei încărcate în câmp electric omogen este o linie dreaptă?
- Deplasându-se între două puncte de pe linia de intensitate a unui câmp electric omogen, diferența de potențial dintre acestea fiind egală cu U_0 , particula încărcată, aflată inițial în repaus, a obținut viteza v_0 . La ce tensiune acceleratoare particula va obține viteza $2v_0$?
- Doi ioni pozitivi, care au sarcini electrice egale și mase diferite, pătrund într-un câmp electric omogen, având viteze mici, de același sens cu liniile de intensitate ale câmpului. Comparați energiile cinetice și vitezele lor, dacă ionii parcurg în câmp distanțe egale. Vitezele inițiale se neglijează.
- O particulă încărcată pătrunde într-un condensator plan încărcat, având viteza paralelă cu plăcile. Cum depinde deviația particulei de la direcția inițială la ieșirea din condensator de valoarea vitezei inițiale? Argumentați răspunsul.
- Un proton intră în spațiul dintre plăcile unui condensator plan prin orificiul din placa încărcată cu sarcină electrică negativă, având viteza perpendiculară pe placă. Intensitatea câmpului electric dintre plăci este egală cu $3 \cdot 10^4$ V/m, distanța dintre ele – cu 2 cm. Să se determine:
 - viteza minimă a protonului necesară pentru a ajunge la placa încărcată cu sarcină pozitivă;
 - distanța minimă dintre proton și placa încărcată cu sarcină pozitivă, dacă viteza cu care protonul trece prin orificiu este de două ori mai mică decât cea determinată în punctul a).
- Ce distanță trebuie să parcurgă un proton în direcția liniei de intensitate a câmpului electric astfel încât viteza lui să se mărească de la $5 \cdot 10^5$ m/s până la $6 \cdot 10^5$ m/s, dacă intensitatea câmpului electric este egală cu $4 \cdot 10^4$ V/m? Care ar fi fost viteza lui, dacă la viteza inițială de $5 \cdot 10^5$ m/s ar fi parcurs distanța determinată mai sus în sens contrar vectorului intensității câmpului electric?
- Un electron intră la mijloc între plăcile unui condensator plan, având viteza paralelă cu ele. Lungimea plăcilor condensatorului în direcția vitezei inițiale a electronului este egală cu 10 cm, distanța dintre ele – cu 4 mm. Care este viteza inițială minimă la care electronul poate ieși din condensator, dacă intensitatea câmpului electric dintre plăci este egală cu $2 \cdot 10^3$ V/m?

TEST DE EVALUARE SUMATIVĂ

PROFIL REAL

1	Completați spațiile punctate astfel încît următoarele afirmații să fie adevărate:		
	a) Corpul care a ... electroni este încărcat cu sarcină electrică pozitivă.		1 p.
	b) Sarcina oricărui corp electrizat este egală cu ... de sarcini electrice elementare.		1 p.
	c) Permitivitatea relativă a dielectricului arată de cîte ori intensitatea cîmpului electric în dielectric este mai ... decît în vid.		1 p.
2	Stabiliți (prin săgeți) corespondența dintre următoarele mărimi fizice și unitățile în care ele se exprimă:		
	sarcina electrică •	• J/C	1 p.
	intensitatea cîmpului electric •	• C	1 p.
	diferența de potențial •	• C/m	1 p.
	capacitatea electrică •	• V/m	1 p.
		• C/V	
3	Determinați valoarea de adevăr a următoarelor afirmații, marcînd „A” dacă afirmația este adevărată și „F” dacă afirmația este falsă:		
	a) Potențialul electric este o caracteristică energetică a cîmpului electric.	<input type="checkbox"/>	1 p.
	b) Lucrul efectuat de cîmpul electrostatic la deplasarea în el a unei sarcini electrice punctiforme depinde de poziția inițială și poziția finală ale acesteia, precum și de forma traiectoriei parcurse între aceste poziții.	<input type="checkbox"/>	1 p.
	c) Capacitatea electrică a unei grupări de condensatoare legate în serie este mai mică decît capacitatea oricărui condensator din grupare.	<input type="checkbox"/>	1 p.
	Itemii 4 și 5 sînt alcătuiți din cîte două afirmații legate între ele prin conjuncția deoarece . Stabiliți dacă afirmațiile sînt adevărate (scriind A) sau false (scriind F) și dacă între ele există relația cauză–efect (scriind da sau nu).		

4	Intensitatea câmpului electrostatic în interiorul unui conductor este zero, <i>deoarece</i> componenta tangențială a intensității câmpului electric este nulă pentru punctele de pe suprafața conductorului.	
	Răspuns:	3 p.
	afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .	
5	La mărirea distanței dintre armăturile unui condensator conectat la o sursă de tensiune electrică constantă, sarcina lui se mărește, <i>deoarece</i> capacitatea electrică a condensatorului este egală cu raportul dintre sarcina electrică a sa și diferența de potențial dintre armături.	
	Răspuns:	3 p.
	afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .	
6	Sarcinile electrice de $+2\text{nC}$ și -4nC se află la distanța de 24 cm una de alta. Să se determine:	
	a) intensitatea câmpului electric în punctul situat la mijlocul segmentului ce unește sarcinile;	3 p.
	b) forța electrică ce ar acționa asupra sarcinii de $4\text{ }\mu\text{C}$ introduse în acest punct.	2 p.
7	Două bile identice având sarcinile electrice $q_1 = +0,6\text{ }\mu\text{C}$ și $q_2 = -0,2\text{ }\mu\text{C}$ se află la distanța $d = 30\text{ cm}$ una de alta.	
	a) Să se determine pe segmentul ce unește sarcinile poziția punctului în care potențialul electric este nul.	3 p.
	b) Bilele au fost puse în contact, apoi îndepărtate pînă la distanța inițială. Calculați potențialul electric în punctul de la mijlocul segmentului ce unește bilele.	3 p.
8	Un condensator plan este conectat la o sursă de tensiune electrică egală cu 36 V. Capacitatea electrică a condensatorului este de 7,2 nF, între armăturile lui se află o placă de sticlă ($\epsilon_r = 6,5$) a cărei grosime este egală cu distanța dintre ele. Să se calculeze:	
	a) sarcina electrică a condensatorului;	1 p.
	b) valoarea sarcinii acestuia după scoaterea dintre armăturile lui a plăcii de sticlă pe jumătate;	3 p.
	c) variația energiei condensatorului la scoaterea plăcii din p. b.	3 p.

PROFIL UMANIST

1	Completați spațiile punctate astfel încît următoarele afirmații să fie adevărate:		
	a) Corpul care a ... electroni este încărcat cu sarcină electrică negativă.		1 p.
	b) Cea mai mică sarcină electrică existentă în natură în stare liberă este numită		1 p.
	c) În interiorul conductorului aflat în câmp electrostatic intensitatea câmpului electric		1 p.
2	Stabiliți (prin săgeți) corespondența dintre următoarele mărimi fizice și unitățile în care ele se exprimă:		
	sarcina electrică	• F	1 p.
	intensitatea câmpului electric	• V	1 p.
	diferența de potențial	• V/C	1 p.
	capacitatea electrică	• N/C	1 p.
		• C	
3	Determinați valoarea de adevăr a următoarelor afirmații, marcînd „A” dacă afirmația este adevărată și „F” dacă afirmația este falsă:		
	a) Intensitatea câmpului electric în punctul dat este egală cu produsul dintre forța ce acționează asupra sarcinii punctiforme aflate în acest punct și valoarea acestei sarcini.	<input type="checkbox"/>	1 p.
	b) La introducerea între două plăci electrizate cu sarcini de semne opuse a unui dielectric, acesta se polarizează, pe suprafețele lui se află sarcini electrice legate de semne opuse celor ale plăcilor din vecinătate.	<input type="checkbox"/>	1 p.
	c) La mărirea distanței dintre plăcile paralele ale unui condensator plan, capacitatea electrică a lui se mărește.	<input type="checkbox"/>	1 p.
	Itemii 4 și 5 sînt alcătuiți din cîte două afirmații legate între ele prin conjuncția deoarece . Stabiliți dacă afirmațiile sînt adevărate (scriind A) sau false (scriind F) și dacă între ele există relația cauză–efect (scriind da sau nu).		
4	Liniiile de intensitate ale câmpului electrostatic nu se intersectează, deoarece liniiile de intensitate ale câmpului electric omogen sînt paralele între ele și echi-distante.		
	Răspuns:		3 p.
	afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .		

5	Lucrul efectuat la deplasarea sarcinii electrice punctiforme pe suprafața unui conductor este nul, <i>deoarece</i> potențialul electric ia una și aceeași valoare în toate punctele conductorului.	
	Răspuns:	3 p.
	afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .	
6	Forța de interacțiune dintre sarcinile electrice punctiforme $q_1 = 6 \mu\text{C}$ și $q_2 = 5 \mu\text{C}$ este egală cu 12 N. Determinați:	
	a) distanța dintre sarcini;	2 p.
	b) intensitatea câmpului electric creat de sarcina electrică q_1 în punctul în care se află sarcina q_2 .	2 p.
7	La deplasarea sarcinii electrice punctiforme de $4 \mu\text{C}$ dintr-un punct în altul al câmpului electrostatic, câmpul a efectuat un lucru egal cu 1,4 mJ. Știind că potențialul electric în punctul inițial ocupat de sarcină este egal cu 50 V, să se determine:	
	a) potențialul electric în poziția finală a sarcinii punctiforme;	3 p.
	b) energia potențială a sarcinii punctiforme în poziția finală a sa.	3 p.
8	Un condensator plan cu aer, avînd capacitatea electrică de $0,8 \mu\text{F}$, a fost încărcat de la o sursă de tensiune electrică de 55 V, apoi deconectat de la aceasta. Să se calculeze:	
	a) sarcina electrică a condensatorului;	2 p.
	b) tensiunea electrică dintre armături după umplerea totală a spațiului dintre ele cu parafină ($\epsilon = 2,2$).	3 p.



ELECTROCINETICA. CURENTUL ELECTRIC ÎN DIFERITE MEDII

5.1 CURENTUL ELECTRIC. NOȚIUNI FUNDAMENTALE

a. Curentul electric staționar. Intensitatea curentului

După cum cunoaștem de la orele de fizică din clasa a VIII-a, **curentul electric este mișcarea ordonată (orientată) a particulelor purtătoare de sarcină electrică.**

S-a convenit să se considere drept **sens al curentului electric sensul în care se deplasează sarcinile electrice pozitive.** Dacă însă sarcina electrică a purtătorilor ei este negativă, sensul curentului electric este contrar celui în care se deplasează purtătorii.

Circulația curentului electric prin conductor este însoțită de transportul sarcinii prin secțiunea sa transversală. Pentru a caracteriza curentul electric, a compara între ei curenții electrici, se introduce mărimea fizică **scalară** numită **intensitate I a curentului electric.**

Notăm cu Δq sarcina electrică transportată prin secțiunea transversală a conductorului în intervalul de timp Δt . Conform definiției, intensitatea curentului:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (5.1)$$

Intensitatea curentului electric în conductor este egală cu raportul dintre sarcina electrică transportată prin secțiunea transversală a lui și intervalul respectiv de timp.


În caz general, intensitatea curentului poate varia în timp; mai mult decât atât, curentul poate să-și schimbe sensul. În capitolul de față se va studia curentul electric ale cărui sens și intensitate nu variază.

Curentul electric a cărui intensitate nu variază în timp ($I = \text{const.}$) este numit **staționar sau **continuu.****

În cazul curentului continuu, definiția (5.1) poate fi scrisă pentru orice interval de timp, raportul rămânând același:

$$I = \frac{q}{t}, \quad (5.2)$$

unde q este sarcina electrică transportată prin secțiunea transversală a conductorului în intervalul de timp t .

Unitatea de intensitate a curentului electric se numește **amper** (simbolul A) și este o **unitate fundamentală** în Sistemul Internațional. Intensitatea curentului electric se măsoară cu **ampermetrul**, simbolul grafic al acestuia în scheme este .

Acesta trebuie conectat în circuit astfel încât toată sarcina electrică care circulă prin conductor să traverseze ampermetrul, adică trebuie conectat în serie.

Din definiția (5.2) exprimăm **sarcina electrică** q transportată prin conductor în timpul t , numită, de asemenea, **cantitate de electricitate**:

$$q = It. \quad (5.3)$$

Această relație ne permite să definim **coulombul** ca unitate de sarcină electrică:

$$1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s}.$$

Coulombul este egal cu sarcina electrică transportată timp de o secundă prin secțiunea transversală a conductorului parcurs de curentul continuu cu intensitatea de 1 A.

În circuitele de curent continuu intensitățile curenților nu variază în timp, deci nu au loc acumulări de sarcini electrice într-o regiune sau alta a circuitului, deoarece acestea ar influența valorile intensităților. Aplicând legea conservării sarcinii electrice la situația de acest gen, conchidem:

Intensitatea curentului electric continuu în toate secțiunile circuitului fără ramificații are una și aceeași valoare.

De aici rezultă că ampermetrul conectat în orice loc al circuitului fără ramificații indică una și aceeași valoare a intensității curentului.

Considerăm un punct A al circuitului în care sînt legate trei sau mai multe conductoare (fig. 5.1). Un astfel de punct este numit **nod**. Aplicînd legea conservării sarcinii electrice la nodul din figură, obținem:

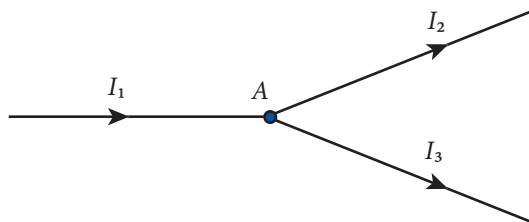


Fig. 5.1

$$I_1 = I_2 + I_3. \quad (5.4)$$

Rezultatul (5.4) a fost stabilit pentru nodul în care sînt legate trei conductoare. Pentru noduri în care sînt legate mai multe conductoare, relația (5.4) este înlocuită cu o alta care conține numărul respectiv de termeni. Astfel, **suma intensităților curenților electrici care intră într-un nod al rețelei de curent continuu este egală cu suma intensităților curenților care ies din acel nod.**

Acest rezultat este cunoscut sub numele de **teorema (legea sau regula) întâi a lui Kirchhoff** și se aplică pe larg la calcularea rețelelor de curent electric.

b. Condițiile de existență a curentului electric continuu. Tensiunea electromotoare

Curentul electric poate exista numai în substanțele în care purtătorii de sarcină electrică se pot deplasa în tot volumul conductorului, adică la distanțe mult mai mari decât dimensiunile atomului. Astfel de purtători sînt numiți **liberi**, iar substanțele – **conductoare**. **Existența purtătorilor liberi de sarcină electrică este o condiție de existență a curentului electric.**

Purtători liberi de sarcină electrică în metale sînt **electronii liberi** (vezi par. 5.5), în gaze – **ionii pozitivi, negativi și electronii**, în electroliți – **ionii pozitivi și cei negativi**. În capitolul de față cercetăm mai detaliat curentul electric în metale, în capitolul următor se va studia curentul electric în diferite medii.

Electronii liberi pot efectua mișcare ordonată, concomitent cu cea haotică (termică), numai dacă asupra lor acționează anumite forțe, care le imprimă accelerații de același sens. Astfel de forțe pot acționa din partea cîmpului electric. Existența cîmpului electric în conductor impune ca între capetele acestuia să existe o diferență de potențial (vezi formula 4.22). Prin urmare, **curentul electric circulă numai prin conductorul între capetele căruia există diferență de potențial, adică tensiune electrică.**

Tensiunea electrică se măsoară cu voltmetrul, al cărui simbol grafic este $\text{---}(\text{V})\text{---}$.

Bornele acestuia se conectează la capetele conductorului, tensiunea dintre care se măsoară.

Mai sus s-a menționat că drept sens al curentului electric se ia sensul mișcării sarcinilor pozitive. Acestea se mișcă în sensul cîmpului electric, adică în sensul în care potențialul electric descrește. Prin urmare, **curentul electric circulă de la potențialul electric mai mare spre potențialul mai mic.**

Pentru a clarifica problema obținerii curentului continuu, să analizăm o situație analoagă din hidrodinamică. În vasul A și tubul T de sub el se află lichid (fig. 5.2). La deschiderea robinetului R lichidul trece din vasul A în vasul B , după care mișcarea lui încetează. Lichidul va curge continuu numai într-un circuit închis, care conține obligatoriu o pompă P (fig. 5.3). Sub acțiunea forței de greutate, lichidul curge prin tubul T de sus în jos. În urma presiunii paletelor pompei P asupra lichidului, acesta urcă în sus prin tubul T' , în sens contrar acțiunii forței de greutate. Astfel este asigurată curgerea staționară a lichidului prin sistemul de tuburi.

În circuitul electric purtătorii de sarcină pozitivă se deplasează de la punctele cu potențial electric mai mare spre cele cu potențialul mai mic. Curentul electric ar putea fi continuu doar într-un circuit închis care ar conține o „pompă electrică”, ce ar deplasa sarcinile pozitive din punctele cu potențial mai mic în cele cu potențial mai mare, adică în sens contrar celui în care acționează forțele electrostatice (coulombiene). Forțele respective sînt numite forțe **secundare** sau **exterioare**. Natura lor este diferită de cea electrostatică, ele efectuează un lucru la deplasarea purtătorilor de sarcină pe seama energiilor de formă deosebită de cea electrostatică, de exemplu, chimică, mecanică etc.

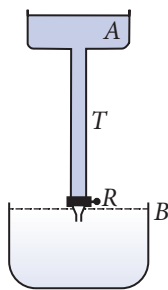


Fig. 5.2

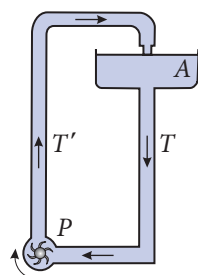


Fig. 5.3

Elementul de circuit electric în care acționează forțele secundare este numit **sursă** sau **generator de curent**.

Simbolul grafic al ei în schemele electrice este $\text{---}| \text{---}|^+$ sau $\text{---} \bigcirc \text{---}$.

Reprezentăm în *figura 5.4* un circuit electric simplu. Se observă că în partea exterioară a circuitului (față de sursă) sarcinile electrice pozitive se deplasează sub acțiunea forțelor electrostatice de la borna pozitivă spre cea negativă. **În interiorul sursei însă sarcinile pozitive se deplasează, sub acțiunea forțelor secundare, de la borna negativă spre cea pozitivă, în sens contrar forțelor electrostatice.**

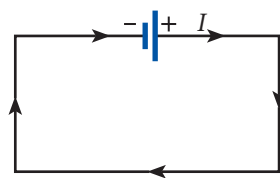


Fig. 5.4

Deplasând sarcinile electrice, forțele secundare efectuează un lucru $L_{sec.}$. Acest lucru este mai mare în cazul în care sarcina q deplasată de acestea este mai mare, $L_{sec.} \sim q$. Raportul $L_{sec.}/q$ nu depinde de sarcina electrică transportată prin circuit, este considerat o mărime ce caracterizează sursa de curent și se numește **tensiune electromotoare**:

$$\mathcal{E} = \frac{L_{sec.}}{q}. \quad (5.5)$$

Tensiunea electromotoare (t.e.m.) a sursei de curent este egală cu raportul dintre lucrul efectuat de forțele secundare la deplasarea sarcinii electrice prin circuit și mărimea acestei sarcini.

Unitatea de tensiune electromotoare este:

$$[\mathcal{E}] = \frac{[L_{sec.}]}{[q]} = \frac{J}{C} = V,$$

adică aceeași ca și a tensiunii electrice, a diferenței de potențial.

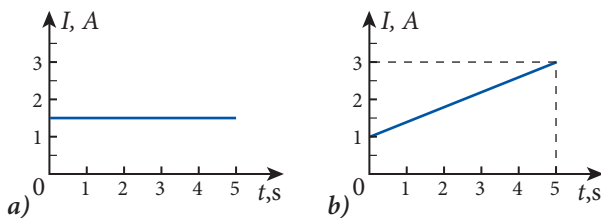
Tensiunea electromotoare este o caracteristică importantă a sursei de curent. Pe sursele folosite în viața cotidiană puteți citi valorile respective: 1,5 V, 4,5 V, 6 V, 9 V etc.

Rezumăm: curentul electric continuu poate exista numai în cazul în care în toate elementele circuitului există purtători liberi de sarcină electrică, circuitul este închis și conține una sau mai multe surse de curent.

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Ce numim curent electric? Care este sensul acestuia?
2. Cum se definește intensitatea curentului electric?
3. Ce condiție satisfac intensitățile curenților electrici care parcurg conductoarele legate într-un nod al circuitului electric?
4. Care purtători de sarcină electrică sînt numiți purtători liberi?
5. Ce forțe deplasează purtătorii liberi de sarcină în exteriorul sursei? Dar în interiorul ei?
6. Cum se definește tensiunea electromotoare a sursei de curent?
7. Să se calculeze sarcina electrică transportată în 6 s prin secțiunea transversală a conductorului parcurs de un curent electric cu intensitatea de 1,25 A.
8. Secțiunea transversală a unui conductor metalic a fost traversată de $6 \cdot 10^{19}$ electroni în 8 s. Care este intensitatea curentului electric în conductor?

9. Să se determine sarcina electrică transportată prin secțiunea transversală a unui conductor timp de 12 s, dacă în 7 s același curent electric a transportat prin secțiune sarcina electrică egală cu 10,5 C. Care este intensitatea curentului electric prin conductor?
10. Într-un nod al circuitului electric sînt legate 3 conductoare. Prin unul din ele intră în nod un curent cu intensitatea de 1,2 A, prin altul – iese un curent cu intensitatea de 1,7 A. Care este intensitatea curentului electric prin conductorul al treilea? Ieșe sau intră în nod acest curent?



11. În figura 5.5 sînt reprezentate grafice care exprimă intensitatea curentului electric prin conductoare în funcție de timp. Propuneți metoda grafică ce ar permite să se determine sarcina electrică transportată prin conductor într-un interval anumit de timp. Determinați pentru ambele cazuri valorile sarcinilor electrice transportate prin conductoare în intervalul de timp de la 0 pînă la 5 s.

5.2

LEGILE CURENTULUI ELECTRIC STAȚIONAR

a. Legea lui Ohm pentru o porțiune omogenă de circuit. Rezistența electrică

Vom recapitula succint materialul studiat în gimnaziu la această temă.

Să considerăm o porțiune de circuit în care nu acționează forțe secundare, adică o porțiune care nu conține surse de curent electric. O astfel de porțiune este numită **omogenă**. În concordanță cu cele menționate mai sus, intensitatea curentului electric I în ea este diferită de zero numai dacă la capetele ei este aplicată o tensiune electrică $U = \varphi_1 - \varphi_2$. Putem afirma că intensitatea curentului I este în funcție de tensiunea U .

În 1826, Ohm a stabilit pe cale experimentală:

intensitatea curentului electric prin conductor este direct proporțională cu tensiunea aplicată la capetele acestuia: $I \sim U$.

Rezultatul dat este cunoscut ca **legea lui Ohm pentru o porțiune omogenă de circuit**. Trecînd la egalitate, introducăm un coeficient de proporționalitate $1/R$. Avem:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R}. \quad (5.6)$$

Mărimea R este numită **rezistență electrică** și este o caracteristică a conductorului.

Relația (5.6) este expresia matematică a legii lui Ohm pentru o porțiune omogenă de circuit. Rezistența electrică:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (5.7)$$

Unitatea de rezistență poartă numele de **ohm** cu simbolul Ω .

Din (5.7) conchidem că **1 Ω este rezistența conductorului parcurs de un curent cu intensitatea de 1 A la o tensiune electrică dintre capetele lui egală cu 1 V.**



A efectuat cercetări vaste în domeniul electricității. A introdus noțiunile de rezistență electrică a conductorului, de tensiune electromotoare a sursei de curent. În 1826 a stabilit relația dintre intensitatea curentului, tensiunea electrică și rezistența conductorului, relație care poartă denumirea de legea lui Ohm. A studiat dependența rezistenței conductorului metalic de temperatură. Ohm a făcut analogii între propagarea „electricității” și propagarea căldurii, între curentul electric și curgerea lichidului prin tuburi.

A realizat cercetări în domeniul acusticii. A stabilit că semnalul sonor constituie o combinație dintre oscilația armonică de bază și armonici suplimentare, ale căror frecvențe sînt multiple în raport cu frecvența de bază. Acest rezultat a fost numit ulterior legea acustică a lui Ohm. În onoarea lui Ohm, unitatea de rezistență electrică îi poartă numele.

Din aceeași formulă (5.7) stabilim relația dintre unitățile mărimilor respective:

$$[R] = \frac{[U]}{[I]} = \frac{V}{A} = \Omega.$$

Cercetînd rezistențele conductoarelor cilindrice de secțiune constantă și confecționate din același material, Ohm a stabilit că ele sînt egale în cazul în care rapoartele dintre lungimile lor l și ariile secțiunilor transversale S sînt egale. Rezistențele sînt mai mari la lungimi l mai mari (la aceeași secțiune S). Astfel s-a ajuns la concluzia că

$$R \sim \frac{l}{S}.$$

Făcînd egalitate, introducem un coeficient de proporționalitate ρ dependent de natura substanței din care este confecționat conductorul. Obținem:


$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (5.8)$$

Mărimea ρ , numită **rezistivitate**, este o caracteristică a substanței și depinde de temperatură.

Pentru unitatea de rezistivitate avem:

$$[\rho] = \frac{[R] \cdot [S]}{[l]} = \Omega \cdot m.$$

Rezultă că pentru $\rho = 1 \Omega \cdot m$ un conductor de formă cilindrică cu aria secțiunii transversale $S = 1 m^2$ și lungimea $l = 1 m$ are rezistența $R = 1 \Omega$.

Elementul de circuit electric caracterizat de o anumită valoare constantă a rezistenței sale este numit **rezistor**. Simbolul grafic al lui este . Lîngă acest simbol este scrisă litera R , care poate fi însoțită de anumiți indici în cazul circuitului ce conține mai multe rezistoare. Conductoarele de legătură au și ele rezistență, însă acestea sînt mult mai mici decît ale rezistoarelor și se neglijează.

În circuitele electrice se întîlnesc diferite grupări de rezistoare și se pune problema ca gruparea să fie înlocuită cu un singur rezistor, a cărui rezistență este numită **rezistență echivalentă**.

Să analizăm grupări concrete ale rezistoarelor.

În figura 5.6 este reprezentată **gruparea în serie** a unor rezistoare, ale căror rezistențe sînt egale cu R_1, R_2, R_3 . Gruparea nu conține ramificații, începutul unui rezistor este legat de sfîrșitul celui precedent, intensitatea curentului I este comună, aceeași prin toate rezistoarele: $I_s = I_1 = I_2 = I_3$.

Ținînd seama că tensiunea dintre bornele grupării în serie a rezistoarelor este egală cu suma tensiunilor aplicate rezistoarelor din grupare $U_s = U_1 + U_2 + U_3$ și aplicînd legea lui Ohm, pentru rezistența echivalentă a grupării în serie avem:

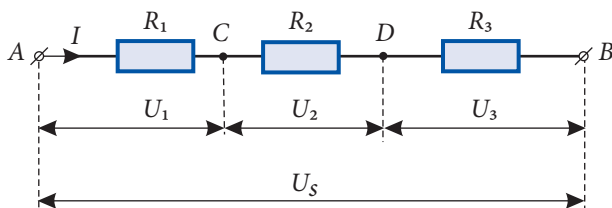


Fig. 5.6

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3. \quad (5.9)$$

Rezistența echivalentă a grupării în serie a rezistoarelor este egală cu suma rezistențelor tuturor rezistoarelor din grupare.

Să considerăm o altă modalitate de legare a rezistoarelor – **în paralel**, numită și **grupare (legare) în derivație**. În acest caz rezistoarele sînt conectate între aceleași două noduri (fig. 5.7). Din figură se vede că tensiunea U aplicată grupării este egală cu tensiunea aplicată fiecărui rezistor din ea: $U_p = U_1 = U_2 = U_3$. Anterior s-a stabilit

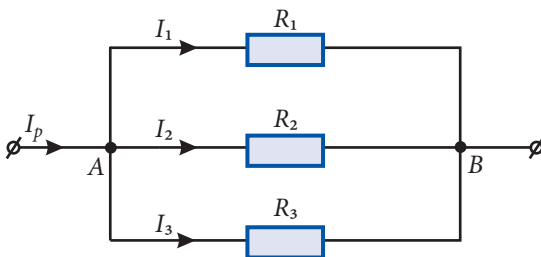


Fig. 5.7

(relația (5.4)) că intensitatea curentului I_p care intră în nodul A este egală cu suma intensităților curenților ce ies din el, adică $I_p = I_1 + I_2 + I_3$. În această situație, aplicînd legea lui Ohm, obținem relația pentru determinarea rezistenței echivalente R_p :

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}. \quad (5.10)$$

Mărima inversă a rezistenței unei grupări în paralel (derivație) a rezistoarelor este egală cu suma mărimilor inverse ale rezistențelor tuturor rezistoarelor din grupare.

Din formulele (5.9) și (5.10) conchidem că rezistența echivalentă a grupării în serie este mai mare decît valoarea cea mai mare din rezistențele rezistoarelor ce fac parte din grupare, iar în cazul grupării în paralel rezistența echivalentă este mai mică decît cea mai mică dintre rezistențele rezistoarelor din componența grupării.

Posibilitatea modificării rezistenței prin gruparea rezistoarelor este utilizată în **reostate** – dispozitive a căror rezistență este variabilă. Cel mai frecvent este utilizat **reostatul cu un cursor** (fig. 5.8, a).

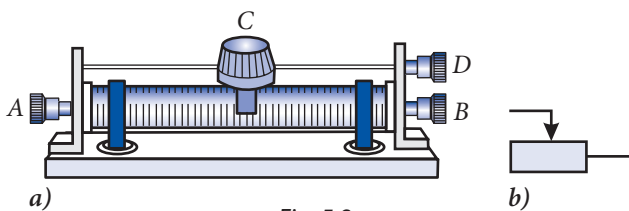


Fig. 5.8

Acesta reprezintă o bobină de sîrmă dintr-un aliaj cu rezistivitate mai mare (de exemplu, nichelină, fecral), înfășurată pe un cilindru din material izolator, de obicei ceramică. Spirele bobinei sînt izolate între ele. Capetele sîrmei sînt legate la bornele A și B ale reostatului. Deasupra bobinei, paralel cu axa ei, este fixată o vergea metalică pe care se poate deplasa cursorul C , care realizează contactul electric între vergea și spirele respective ale bobinei. La capătul vergelei se află o a treia bornă, D . La unele din ele borna A sau B este lipsă. Reostatul se introduce în circuit fiind unit la borna D și la una din bornele A , B . Curentul electric circulă prin vergea de la borna D pînă la cursorul C , apoi prin cursor și prin spirele dintre cursor și borna A sau B , legată în circuit. La deplasarea cursorului numărul de spire, legate în serie, parcurse de curent se mărește sau se micșorează. Respectiv, se mărește sau se micșorează rezistența reostatului. Simbolul grafic este reprezentat în figura 5.8, b .

Reostatele cu un cursor permit variația lentă a rezistenței (cu valoarea rezistenței unei spire).

b. Lucrul și puterea curentului electric. Legea lui Joule

Imprimînd mișcare ordonată purtătorilor liberi de sarcină, cîmpul electric efectuează un lucru, numit de obicei **lucru al curentului electric**. La deplasarea sarcinii electrice q prin porțiunea de circuit, tensiunea dintre capetele căreia este egală cu U , lucrul curentului electric în corespundere cu formula (4.19) este $L = qU$. La intensitatea curentului continuu egală cu I pentru sarcina electrică transportată prin conductor în timpul t (vezi formula 5.3), avem $q = It$. Astfel, pentru lucrul curentului electric obținem expresia

$$L = IUt. \quad (5.11)$$

Ținînd seama de legea lui Ohm, avem:

$$L = I^2 R t \quad \text{sau} \quad L = \frac{U^2}{R} t. \quad (5.12)$$

Menționăm că relația (5.11) se aplică la transformarea energiei sub orice altă formă – mecanică, chimică, internă –, iar relațiile (5.12) numai în cazul în care consumatorul este un rezistor, deci energia electrică se transformă în internă, se degajă sub formă de căldură.

Pentru puterea dezvoltată de curentul electric, egală numeric cu lucrul efectuat într-o unitate de timp, obținem:

$$P = \frac{L}{t} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (5.13)$$

La efectuarea calculelor se utilizează formulele (5.11)–(5.13), mai potrivite pentru cazul concret analizat în problemă.

De exemplu, în cazul conductoarelor de rezistențe R_1 și R_2 , legate în serie, intensitatea curentului în ele este aceeași. Din formula pentru putere sub forma $P = I^2 R$, rezultă:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (5.14)$$

La legarea în serie, raportul puterilor dezvoltate în diferite porțiuni ale circuitului este egal cu raportul rezistențelor respective. Puterea dezvoltată este mai mare în porțiunea a cărei rezistență electrică este mai mare.

Dacă însă conductoarele sînt legate în paralel, tensiunile dintre capetele lor sînt aceleași. În conformitate cu expresia $P = \frac{U^2}{R}$, pentru raportul puterilor dezvoltate avem:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (5.15)$$

Raportul puterilor dezvoltate de curentul electric în conductoarele legate în paralel este egal cu inversul raportului rezistențelor respective, adică o putere mai mare este dezvoltată în conductorul cu rezistență mai mică.

Formulele (5.11) și (5.13) permit să exprimăm unitățile pentru lucru (J) și putere (W) prin unitățile mărimilor electrice:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ A} \cdot \text{V} \cdot \text{s} \quad \text{și} \quad 1 \text{ W} = 1 \text{ A} \cdot \text{V}.$$

În electrotehnică se folosește o unitate deosebită pentru energie, cunoscută sub denumirea de **kilowatt-oră** (simbolul kW · h). Ea este egală cu lucrul efectuat de curentul electric timp de o oră la o putere egală cu 1 kW. Stabilim legătura dintre această unitate și joule:

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 10^3 \text{ W} \cdot 3\,600 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}.$$

În cazul în care lucrul curentului electric nu se transformă în energie chimică (de exemplu, la încărcarea acumulatorilor) sau în energie mecanică (de exemplu, la motoarele electrice), el se transformă complet în energia internă a consumatorului (de exemplu, la reșoul electric, la becul cu incandescență ș.a.).

Să analizăm mecanismul acestei transformări. Cîmpul electric din conductor accelerează purtătorii de sarcină, energiile cinetice ale acestora se măresc. În urma ciocnirilor cu ionii pozitivi din nodurile rețelei cristaline a metalului, purtătorii de sarcină le cedează o parte din energia cinetică proprie. În consecință, energiile cinetice ale ionilor se măresc, crește intensitatea mișcărilor termice, respectiv, crește temperatura conductorului. Acesta degajă căldură. În conformitate cu legea conservării și transformării energiei, cantitatea de căldură degajată de conductor este egală cu lucrul curentului electric: $Q = L$. Astfel, în corespundere cu expresia (5.12), pentru cantitatea de căldură degajată avem:

$$Q = I^2 R t. \quad (5.16)$$

Cantitatea de căldură degajată în conductorul parcurs de curent electric este egală cu produsul dintre pătratul intensității curentului, rezistența conductorului și durata circulației curentului prin el.

Această expresie este cunoscută sub denumirea de **legea lui Joule**, în cinstea fizicianului englez care a stabilit-o în 1841. Doi ani mai târziu aceeași formulă a fost publicată, independent, de fizicianul rus Lenz, din care cauză legea respectivă este cunoscută și ca legea Joule-Lenz.

Efectul termic al curentului electric are nenumărate aplicații în viața cotidiană și în tehnică. Funcționarea aparatelor electrocasnice (becul cu incandescență, reșoul electric, fierbătorul electric, fierul de călcat, cuptorul electric și multe altele) este bazată pe efectul degajării de căldură în conductoare din materiale cu rezistivitate mare și temperatură de topire înaltă (de obicei, nicrom sau fecral).

În tehnică, efectul termic al curentului electric este utilizat la sudarea prin contact a metalelor cu rezistivitate considerabilă (nichel, molibden, tantal ș.a.).

Pentru protejarea conductoarelor și a surselor de curent din diverse circuite se folosesc siguranțele fuzibile. Acestea sînt niște conductoare subțiri din materiale ușor fuzibile (plumb, cupru ș.a.) care se topesc atunci cînd intensitatea curentului din circuitul dat întrece o anumită valoare maximă.

c. Legea lui Ohm pentru un circuit întreg

Să considerăm un circuit electric simplu, format dintr-o sursă de curent la bornele căreia este legat un rezistor (fig. 5.9). Rezistorul, a cărui rezistență este egală cu R , reprezintă partea exterioară a circuitului, rezistența R fiind numită și **rezistență exterioară**. Sursa de curent este partea interioară a lui. Sursa este caracterizată nu numai de tensiunea electromotoare, ci și de o anumită rezistență electrică, notată de obicei cu r și numită **rezistență interioară**. Sursa și rezistorul sînt legate în serie, deci rezistența totală a circuitului $R_t = R + r$.

Fie intensitatea curentului prin circuit egală cu I . În intervalul de timp t prin el este transportată sarcina electrică $q = It$ (5.3). Prin urmare, forțele secundare ce acționează în sursă efectuează un lucru a cărui valoare, în conformitate cu (5.5), este:

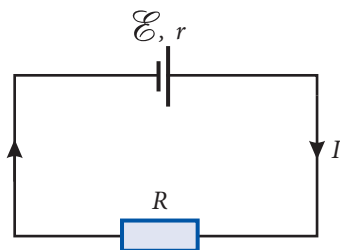


Fig. 5.9

$$L_{sec.} = q\mathcal{E} = It \cdot \mathcal{E}. \quad (5.17)$$

În circuitul considerat, acest lucru poate produce numai creșterea energiei interne a elementelor lui, adică în circuit se degajă o cantitate de căldură Q . În baza legii lui Joule,

$$Q = I^2 R_t t = I^2 (R + r) t.$$

Egalînd $L_{sec.} = Q$ (legea conservării și transformării energiei), după simplificare obținem:

$$\mathcal{E} = I(R + r). \quad (5.18)$$

Intensitatea curentului în circuit:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (5.19)$$

Această formulă exprimă **legea lui Ohm pentru un circuit întreg (simplu)**:

Intensitatea curentului electric într-un circuit întreg (simplu) este egală cu raportul dintre tensiunea electromotoare a sursei de curent din circuit și rezistența totală a acestuia.

Conform legii lui Ohm pentru o porțiune de circuit (5.6), produsul $IR = U$ este tensiunea electrică la bornele sursei, numită și **căderea de tensiune pe circuitul exterior al sursei**. Respectiv, produsul $Ir = u$ este **căderea de tensiune pe interiorul sursei**. Relația (5.18) ia forma:

$$\mathcal{E} = U + u. \quad (5.20)$$

Suma căderilor de tensiune pe circuitul exterior al sursei și pe interiorul ei este egală cu tensiunea electromotoare a sursei.

Dacă la bornele sursei date sînt conectate rezistoare de rezistențe diferite, intensitatea curentului prin circuit se modifică, deci se modifică și căderile de tensiune U și u , suma lor rămînînd aceeași. De acest lucru ne putem convinge realizînd experimentul a cărui schemă este arătată în *figura 5.10*. Sursa de curent reprezintă un vas cu soluție de acid sulfuric diluat, în care sînt introduși doi electrozi – unul de cupru și altul de zinc. La bornele sursei este legat rezistorul de rezistență R și voltmetrul V_1 , care măsoară căderea tensiunii U pe circuitul exterior al sursei. Prin intermediul a doi electrozi din grafit (care nu interacționează cu soluția din sursă), la care este legat voltmetrul V_2 , se măsoară căderea tensiunii u pe interiorul sursei. Folosindu-se rezistoare diferite, se constată veridicitatea relației (5.20).

Din expresia (5.19) observăm că intensitatea curentului în circuitul simplu este determinată de trei parametri: tensiunea electromotoare \mathcal{E} și rezistența interioară r ce caracterizează sursa, precum și rezistența R a părții exterioare a circuitului. Vom admite că sursa de curent rămîne aceeași. În acest caz intensitatea curentului I este în funcție numai de rezistența R .

Din (5.19) se vede că mărirea rezistenței R este însoțită de micșorarea intensității curentului. Respectiv, se micșorează căderea de tensiune u pe interiorul sursei, iar tensiunea U pe exterior se apropie de valoarea tensiunii electromotoare a sursei. Acest rezultat poate fi obținut și pe altă cale. Din relația (5.20), în care substituim $u = Ir$, avem:

$$U = \mathcal{E} - Ir, \quad (5.21)$$

de unde rezultă că la $I \rightarrow 0$ căderea de tensiune $U \rightarrow \mathcal{E}$.

Acest fapt arată că tensiunea electromotoare poate fi măsurată conectîndu-se la bornele ei un voltmetru, a cărui rezistență proprie este mult mai mare decît rezistența interioară a sursei ($R_v \gg r$).

Invers, la micșorarea rezistenței R intensitatea I crește. Situația în care rezistența exterioară devine nulă ($R = 0$) este numită *scurtcircuit*. Valoarea intensității curentului de scurtcircuit, după cum rezultă din (5.19), este:

$$I_{s.c.} = \frac{\mathcal{E}}{r}. \quad (5.22)$$

În cazul surselor de curent cu rezistență interioară mică, la scurtcircuit intensitatea curentului ia valori mari. De exemplu, în cazul acumulatorilor aceasta poate ajunge pînă la zeci și chiar sute de amperi. În aceste condiții acumulatorii pot ieși din uz. De aceea **trebuie să evităm scurtcircuitarea în rețelele electrice**. În acest scop se folosesc siguranțele, de exemplu, cele fuzibile. Ele reprezintă conductoare legate în circuit în serie și care se topesc în cazul în care intensitatea curentului crește pînă la anumite valori, întrerupînd astfel circuitul.

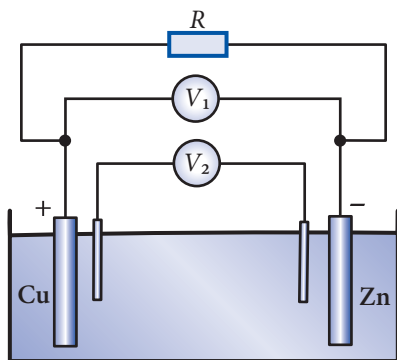


Fig. 5.10

Pentru puterea dezvoltată de sursă în circuitul exterior, ținând seama de legea (5.19), avem:

$$P = I^2 R = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R + r)^2}. \quad (5.23)$$

Din această expresie se observă că puterea P se micșorează atât în cazul în care rezistența exterioară R devine foarte mică ($R \rightarrow 0$), cât și în cazul în care ea devine foarte mare ($R \rightarrow \infty$). Rezultă că există o astfel de valoare a rezistenței R pentru care puterea dezvoltată de sursă în circuitul exterior este maximă. Pentru a determina această valoare, folosim relația evidentă:

$$(R + r)^2 - (R - r)^2 = 4 R r,$$

de unde avem:

$$R = \frac{1}{4r} [(R + r)^2 - (R - r)^2].$$

Substituind această expresie în (5.23), la numărător, obținem:

$$P = \frac{\mathcal{E}^2}{4r} \left(1 - \frac{(R - r)^2}{(R + r)^2} \right).$$

Evident, puterea este maximă $P = P_{\max.}$ pentru $R = r$.

Puterea dezvoltată de sursă în circuitul exterior al ei este maximă dacă rezistența exterioară este egală cu cea interioară. Avem:

$$P_{\max.} = \frac{\mathcal{E}^2}{4r}. \quad (5.24)$$

O parte din puterea dezvoltată de sursă este degajată în interiorul ei, adică se pierde inutil. Circuitul electric este caracterizat, din acest punct de vedere, de **randamentul circuitului**. El se definește ca raportul dintre puterea utilă $P_u = I^2 R$, dezvoltată de sursă în partea exterioară a circuitului, și puterea totală $P_t = I^2 (R + r)$, dezvoltată în circuitul întreg. Avem pentru randament:

$$\eta = \frac{P_u}{P_t} = \frac{R}{R + r}. \quad (5.25)$$

Randamentul este cu atât mai mare cu cât rezistența exterioară este mai mare decât cea interioară. Expresia (5.25) arată că randamentul poate avea valori mari, aproape de unitate (de 100%), la $R \gg r$.

Problemă rezolvată

1

Se dă:

$$R_1 = R = 10 \, \Omega,$$

$$R_2 = 2R,$$

$$R_3 = 3R,$$

$$\mathcal{E} = 24 \, \text{V},$$

$$r = 0,4 \, R$$

$$I_{BC} - ?, I_{AB} - ?;$$

$$\frac{I_{AB}}{I_{BC}} - ?$$

În circuitul din figura 5.11 sînt cunoscute rezistențele $R_1 = R = 10 \, \Omega$, $R_2 = 2R$ și $R_3 = 3R$. T.e.m. a sursei de curent $\mathcal{E} = 24 \, \text{V}$ și are rezistența interioară $r = 0,4 \, R$. Care va fi indicația unui ampermetru cu rezistența neglijabilă, cînd acesta se află pe porțiunea dintre punctele 1) BC ; 2) AB ? De cîte ori se deosebesc intensitățile curenților înregistrați de ampermetru în cele două poziții?

Rezolvare

Ampermetrul introdus în circuit pe porțiunea BC înregistrează curentul care trece prin rezistorul R_3 , iar pe porțiunea AB – curentul care trece prin rezistorul R_1 . În nodul B curentul I_1 se ramifică în curenții I_2 și I_3 și conform primei legi a lui Kirchhoff

$$I_1 = I_2 + I_3.$$

Tensiunea la bornele rezistoarelor R_2 și R_3 legate în paralel este aceeași. Conform legii lui Ohm, pentru o porțiune de circuit această tensiune este

$$I_2 R_2 = I_3 R_3.$$

Din aceste două ecuații pentru curentul $I_3 \equiv I_{BC}$ avem:

$$I_{BC} = \frac{R_2}{R_2 + R_3} I_1.$$

În vederea determinării curentului $I_1 \equiv I_{AB}$, folosim legea lui Ohm pentru un circuit întreg:

$$I_{AB} = \frac{\mathcal{E}}{R_e + r},$$

unde R_e este rezistența părții exterioare a circuitului, iar r – rezistența interioară a sursei. Întrucât rezistoarele R_2 și R_3 sînt legate în paralel, iar R_1 – în serie cu ele, pentru rezistența exterioară avem:

$$R_e = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}.$$

Introducînd R_e în relația pentru I_{AB} , iar rezultatul obținut $I_{AB} = I_1$, în expresia pentru I_{BC} , obținem intensitățile curenților înregistrați de ampermetru în cele două cazuri:

$$I_{AB} = \frac{(R_2 + R_3)\mathcal{E}}{(R_2 + R_3)(R_1 + r) + R_2 R_3} = \frac{5\mathcal{E}}{13R} \approx 0,92A;$$

$$I_{BC} = \frac{R_2 \mathcal{E}}{(R_2 + R_3)(R_1 + r) + R_2 R_3} = \frac{2\mathcal{E}}{13R} \approx 0,37A.$$

Se observă că intensitatea curentului I_{AB} este mai mare decît I_{BC} :

$$\frac{I_{AB}}{I_{BC}} = \frac{5\mathcal{E}}{13R} \cdot \frac{13R}{2\mathcal{E}} = 2,5.$$

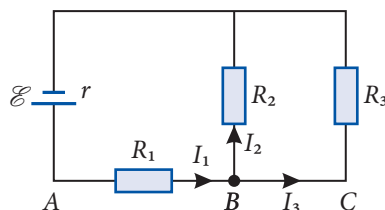


Fig. 5.11

Problemă rezolvată

2

Se dă:

$$r = 1 \Omega,$$

$$R = 6 \Omega$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} - ?$$

La o sursă de curent cu rezistența interioară $r = 1 \Omega$ sînt conectate două reșouri cu aceeași rezistență $R = 6 \Omega$, unul dintre care – prin intermediul întrerupătorului K (fig. 5.12). Determinați

de cîte ori cantitatea de căldură degajată de cele două reșouri după închiderea întrerupătorului K este mai mare decît cantitatea de căldură degajată în același interval de timp de primul reșou înainte de închiderea întrerupătorului.

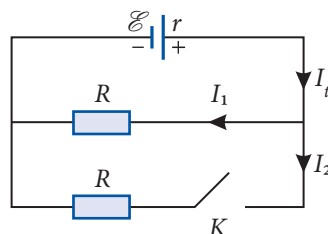


Fig. 5.12

Rezolvare

1. Întrerupătorul K este deschis. În acest caz funcționează numai un reșou ($I_2 = 0$) și căldura degajată, conform legii lui Joule (5.16) $Q_1 = I_1^2 R t$. Curentul I_1 este egal cu cel total I_t , care conform legii lui Ohm pentru un circuit întreg:

$$I_t = \frac{\mathcal{E}}{R + r}.$$

Așadar, căldura degajată

$$Q_1 = \frac{\mathcal{E}^2 R t}{(R + r)^2}.$$

2. Întrerupătorul K este închis, ambele reșouri funcționează. Întrucît rezistențele reșourilor sînt egale, vor fi egale și intensitățile curenților $I_1 = I_2$ (vezi figura 5.12).

Conform primei legi a lui Kirchhoff,

$$I_t = I_1 + I_2 = 2I.$$

Curentul total I_t se determină din legea lui Ohm:

$$I_t = \frac{\mathcal{E}}{R_t + r} = \frac{2\mathcal{E}}{R + 2r},$$

iar curentul care trece prin fiecare reșou

$$I = \frac{I_t}{2} = \frac{\mathcal{E}}{R + 2r}.$$

Cantitatea de căldură Q_2 degajată în acest caz este egală cu suma cantităților de căldură Q_{21} și Q_{22} , degajate de fiecare reșou în același interval de timp t :

$$Q_2 = Q_{21} + Q_{22} = 2I^2 R t = \frac{2\mathcal{E}^2 R t}{(R + 2r)^2}.$$

Făcînd raportul Q_2/Q_1 , obținem de cîte ori cantitatea de căldură la funcționarea ambelor reșouri conectate în paralel este mai mare decît la funcționarea unui singur reșou:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = 2 \left(\frac{R + r}{R + 2r} \right)^2; \frac{Q_2}{Q_1} \approx 1,53.$$

Problemă rezolvată

3

Se dă:

$$I = 2A,$$

$$I_{s.c.} = 10A$$

η - ?

Un circuit compus dintr-un generator și un reostat este parcurs de un curent cu intensitatea $I = 2A$. Care este randamentul generatorului de curent în acest caz, dacă intensitatea curentului de scurtcircuit $I_{s.c.} = 10A$? Obțineți dependența randamentului generatorului de intensitatea curentului din circuit și reprezentați-o grafic.

Rezolvare

În conformitate cu (5.25), randamentul generatorului

$$\eta = \frac{P_u}{P_t}.$$

Puterea utilă P_u este puterea degajată în partea exterioară a circuitului și poate fi determinată cu diferența dintre puterea totală $P_t = I \mathcal{E}$ și puterea degajată în interiorul

generatorului $P_r = I^2 r$, adică

$$P_u = I\mathcal{E} - I^2 r,$$

unde \mathcal{E} și r sînt *t.e.m.* și rezistența interioară a generatorului. Astfel, pentru randament obținem:

$$\eta = \frac{I(\mathcal{E} - Ir)}{\mathcal{E}I} = 1 - \frac{r}{\mathcal{E}} I.$$

Luînd în considerare expresia (5.22) pentru intensitatea curentului de scurtcircuit, randamentul

$$\eta = 1 - \frac{I}{I_{s.c.}}; \eta = 80\%.$$

Se observă că randamentul depinde liniar de intensitatea curentului (fig. 5.13). Modificînd rezistența exterioară a circuitului (cu reostatul), vom schimba și intensitatea curentului. La creșterea acesteia randamentul generatorului se micșorează și devine egal cu zero, cînd intensitatea curentului este egală cu cea de scurtcircuit.

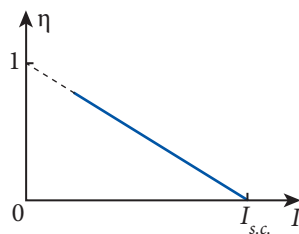


Fig. 5.13

Problemă rezolvată 4

Se dă:

$$C = 50 \mu\text{F},$$

$$\mathcal{E} = 12 \text{ V},$$

$$q = 480 \mu\text{C},$$

$$P = 10 \text{ W}$$

$$r = ?$$

SI:

$$5 \cdot 10^{-5} \text{ F},$$

$$4,8 \cdot 10^{-4} \text{ C}$$

$$\Omega$$

Un rezistor și un condensator de capacitate $C = 50 \mu\text{F}$ sînt legați în paralel și conectați la o sursă de curent cu *t.e.m.* $\mathcal{E} = 12 \text{ V}$ (fig. 5.14). Determinați rezistența interioară a sursei, dacă se știe că la bornele condensatorului s-a acumulat o sarcină $q = 480 \mu\text{C}$, iar în rezistor s-a degajat puterea $P = 10 \text{ W}$.

Rezolvare

Exprimăm rezistența interioară a sursei din legea lui Ohm pentru circuitul întreg (5.19). Avem:

$$r = \frac{\mathcal{E}}{I} - R = \frac{\mathcal{E} - U}{I},$$

unde U este căderea de tensiune pe rezistorul R , egală cu tensiunea la bornele condensatorului

$$U = \frac{q}{C}.$$

Puterea degajată în rezistorul R se exprimă prin intensitatea curentului

$$P = I^2 R = IU = \frac{Iq}{C},$$

de unde $I = \frac{PC}{q}$.

Introducînd expresiile tensiunii U și intensității curentului I în relația pentru rezistența interioară, obținem:

$$r = \frac{(\mathcal{E}C - q)q}{PC^2}; \quad r \approx 2,3 \Omega.$$

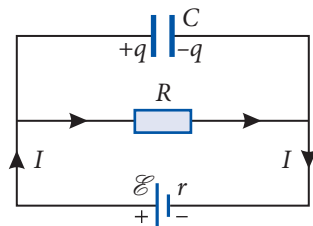


Fig. 5.14

1. Care porțiune de circuit este numită omogenă?
2. Cum se formulează legea lui Ohm pentru o porțiune omogenă de circuit?
3. În *figura 5.15* sînt reprezentate graficele care exprimă intensitatea curentului electric prin porțiuni de circuit cu rezistențe diferite (R_1 și R_2) în funcție de tensiune. Care din rezistențe este mai mică?
4. Cum trebuie grupate două rezistoare pentru ca rezistența grupării să fie mai mică decît rezistențele fiecărui rezistor în parte? Argumentați răspunsul.
5. Care este relația dintre tensiunile de la capetele a două rezistoare legate în serie și valorile rezistențelor acestora?
6. Două rezistoare de rezistențe diferite ($R_1 > R_2$) sînt legate în paralel. În care din ele curentul electric dezvoltă o putere mai mare?
7. Care sînt aplicațiile efectului termic al curentului electric în viața cotidiană și în tehnică?
8. Becul electric și conductoarele de legătură sînt legate în serie, deci parcurse de curent de aceeași intensitate. Cum se explică faptul că filamentul becului se încălzește pînă la incandescentă, în timp ce conductoarele de legătură efectiv nu se încălzesc?
9. Cum se formulează legea lui Ohm pentru circuitul întreg? Ce factori determină intensitatea curentului în circuit?
10. Care sînt factorii ce determină randamentul circuitului de curent electric?
11. Intensitatea curentului prin conductor este egală cu 0,4 A, în cazul în care tensiunea dintre capetele lui este egală cu 10 V. Care este intensitatea curentului la tensiunea de 15 V? Care este rezistența electrică a conductorului?
12. Să se determine lungimea conductorului de constantan cu aria secțiunii transversale de 0,25 mm² dintr-o bobină a cărei rezistență este egală cu 120 Ω. Rezistivitatea constantanului este egală cu $5 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$.
13. Să se determine rezistența grupării mixte de rezistoare reprezentate în *figura 5.16*, dacă $R_1 = 6 \Omega$, $R_2 = 4 \Omega$ și $R_3 = 10 \Omega$. Care este rezistența grupării în cazul în care rezistoarele R_1 și R_2 sînt schimbate cu locul?
14. Două rezistoare avînd rezistențe egale cu 60 Ω și 36 Ω sînt legate în paralel. Ce cantitate de căldură este degajată de primul conductor în intervalul de timp în care conductorul al doilea degajă o cantitate de căldură egală cu 15 kJ?
15. Rezistorul a cărui rezistență este egală cu 9 Ω, conectat la o sursă de curent cu tensiunea electromotoare de 4 V, este parcurs de un curent electric cu intensitatea de 0,4 A. Să se determine intensitatea curentului de scurtcircuit.
16. O sursă de curent cu tensiunea electromotoare de 2 V și rezistența interioară de 1 Ω alimentează un circuit simplu, în care intensitatea curentului este egală cu 0,5 A. Să se determine rezistența exterioară a circuitului, puterea dezvoltată de curent în aceasta, precum și randamentul circuitului electric în acest caz.

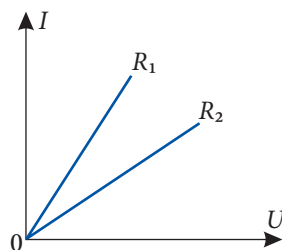


Fig. 5.15

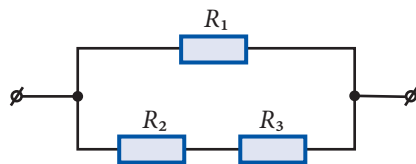


Fig. 5.16

5.3* MĂSURAREA INTENSITĂȚII CURENTULUI ȘI A TENSIUNII ELECTRICE. POTENȚIOMETRUL

a.* Măsurarea intensității curentului. Șuntul ampermetrului

Intensitatea curentului electric se măsoară cu ampermetrul, care se leagă în serie pentru ca sarcina electrică ce străbate porțiunea respectivă de circuit să străbată și ampermetrul. Ca și orice instrument electric de măsură (principiile de funcționare a acestora vor fi studiate ulterior), ampermetrul are rezistență proprie (R_A). Fiind legat în serie, rezistența totală se mărește, respectiv, intensitatea curentului se micșorează. Astfel, ampermetrul indică o valoare mai mică a intensității decât cea care era pînă la introducerea lui în circuit. Pentru a micșora această influență a legării ampermetrului în circuit asupra curentului electric prin el, rezistența proprie a ampermetrului trebuie să fie mult mai mică decât rezistența porțiunii în care este legat. Se construiesc ampermetre cu rezistențe interioare de ordinul zecimilor, sutimilor și chiar al miimilor de ohmi. Fiecare ampermetru este caracterizat nu numai de rezistența sa R_A , ci și de *valoarea maximă nominală* I_m a intensității curentului, ce poate fi măsurată cu el. Introducerea lui în circuitul în care intensitatea $I > I_m$ poate avea ca urmare deteriorarea ampermetrului și ieșirea lui din uz.

În practică însă poate să apară necesitatea măsurării unor intensități care depășesc limita superioară I_m . În acest caz se folosește **șuntul** (din engleză *shunt* „derivare, garare a unui tren pe o linie secundară”). Acesta reprezintă un rezistor care se montează în paralel cu ampermetrul, astfel încît o parte din curentul electric din circuit să treacă prin rezistor, în afara ampermetrului.

Să calculăm rezistența șuntului R_s , a cărui legare în paralel ar permite lărgirea domeniului de măsurare de n ori, adică ar permite să se măsoare intensități I_C în circuit de n ori mai mari decât limita superioară I_m . Prin urmare, $I_C = nI_m$.

Reprezentăm în *figura 5.17* o porțiune de circuit care conține un ampermetru și un șunt. Notăm intensitățile curentului prin ele cu I_A și I_s , iar intensitatea curentului prin circuit cu I_C . Evident, $I_C = I_A + I_s$, deci șuntul este parcurs de curentul electric de intensitate $I_s = I_C - I_A$.

Pentru tensiunea dintre nodurile K și L avem: $U_{KL} = I_A R_A = I_s R_s$, de unde exprimăm rezistența șuntului:

$$R_s = R_A \cdot \frac{I_A}{I_s} = R_A \frac{I_A}{I_C - I_A}.$$

Substituind $I_A = I_m$ și, respectiv, $I_C = nI_m$, determinăm rezistența șuntului:

$$R_s = \frac{R_A}{n - 1}. \quad (5.26)$$

Rezistența șuntului, care, fiind montat paralel cu ampermetrul, permite să se lărgască domeniul de măsurare al acestuia de n ori, este de $(n - 1)$ ori mai mică decât rezistența ampermetrului.

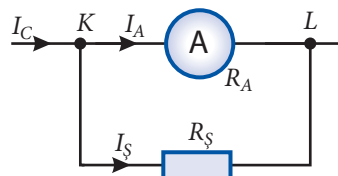


Fig. 5.17

De exemplu, vrem să măsurăm intensități de pînă la 10 A cu un ampermetru care permite a măsura intensități numai pînă la 2 A. În acest caz $n = 5$ și rezistența șuntului trebuie să fie de $(n - 1) = 4$ ori mai mică decît rezistența ampermetrului. Evident, unei diviziuni de pe scala lui îi revine un interval de valori ale intensității de n ori mai mare decît al diviziunii de pe scala ampermetrului fără șunt.

Menționăm, de asemenea, că rezistența ampermetrului cu șunt este mai mică decît rezistența ampermetrului fără acesta; prin urmare, ampermetrul cu șunt modifică mai puțin intensitatea curentului în circuit.

b.* Măsurarea tensiunii electrice. Rezistența adițională

Pentru a măsura tensiunea electrică între capetele unei porțiuni de circuit, voltmetrul se conectează în paralel cu aceasta. Dacă rezistența porțiunii de circuit este egală cu R , a voltmetrului – cu R_V , atunci după conectarea voltmetrului rezistența dintre capetele porțiunii considerate devine $R' = \frac{R R_V}{R + R_V} = \frac{R}{1 + R/R_V}$. Observăm că $R' < R$, adică după conectarea voltmetrului rezistența dintre capetele porțiunii s-a micșorat. Prin urmare, intensitatea curentului prin circuit s-a mărit. Voltmetrul nu va indica tensiunea reală existentă dintre capetele porțiunii de circuit înainte de conectarea lui.

Din expresia pentru rezistența grupării R' observăm că ea este cu atît mai aproape de rezistența R cu cît rezistența voltmetrului este mai mare decît R , adică $R_V \gg R$. De această condiție se ține seama la construirea voltmetrelor cu rezistențe de mii, zeci și chiar sute de mii de ohmi.

Fiecare voltmetru permite măsurarea unor tensiuni electrice care nu depășesc o valoare maximă anumită U_m – **valoarea nominală** sau **limita superioară a domeniului de măsurare**. Pentru a lărgi domeniul de măsurare în serie cu voltmetrul, se conectează un rezistor de o anumită valoare a rezistenței (fig. 5.18). Acest rezistor este numit **rezistență adițională**.

Să calculăm valoarea rezistenței adiționale care ar permite lărgirea domeniului de măsurare al voltmetrului de n ori, adică măsurarea unor tensiuni cu valori de pînă la $U = nU_m$.

Notăm cu U_V tensiunea dintre bornele voltmetrului, cu U_a – tensiunea dintre capetele rezistenței adiționale și cu U – tensiunea dintre capetele rezistorului R , adică cea măsurată. Voltmetrul și rezistența adițională sînt legate în serie, deci (fig. 5.18) $U = U_a + U_V$ și $U_a = U - U_V$.

Intensitatea curentului I_V prin voltmetru și prin rezistența adițională este aceeași, anume

$$I_V = \frac{U_V}{R_V} = \frac{U_a}{R_a}. \text{ Prin urmare, } R_a = R_V \cdot \frac{U_a}{U_V} = R_V \cdot \frac{U - U_V}{U_V}.$$

Substituind valoarea maximă $U_V = U_m$ și, respectiv, $U = nU_m$, obținem valoarea rezistenței adiționale:

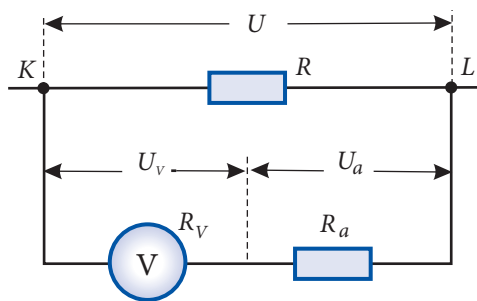


Fig. 5.18

$$R_a = (n - 1)R_V. \quad (5.27)$$

Pentru a lărgi domeniul de măsurare al voltmetrului de n ori, în serie cu el se leagă o rezistență adițională a cărei valoare este de $(n - 1)$ ori mai mare decât cea a voltmetrului.

De exemplu, pentru a lărgi domeniul de măsurare al unui voltmetru de la 15 V pînă la 300 V, adică de $n = 20$ de ori, în serie cu el trebuie conectată o rezistență adițională a cărei valoare este de 19 ori mai mare decât rezistența interioară a voltmetrului. În acest caz unei diviziuni a voltmetrului îi corespunde un interval de valori ale tensiunii de 20 de ori mai mare decât intervalul de pînă la conectarea rezistenței adiționale.

Evident, voltmetrul cu rezistență adițională modifică curentul prin circuit mai puțin decât voltmetrul fără ea.

c.* Potențiometrul

Mai sus (par. 4.2, *b*) a fost expusă metoda prin care poate fi modificată intensitatea curentului electric în circuit. În acest scop a fost folosit reostatul – un dispozitiv cu rezistență variabilă. Același reostat (cu trei borne) poate fi utilizat pentru a modifica tensiunea electrică. În acest caz el este numit **divizor de tensiune** sau **potențiometrul**.

Schema conectării potențiometrului este reprezentată în *figura 5.19*. Sursa de curent S este conectată la capetele A și B ale bobinei. Receptorul Re este conectat la una dintre bornele bobinei (în *fig. 5.19* la borna A) și la cursorul C . Astfel, tensiunea de alimentare a receptorului este mai mică decât tensiunea dintre bornele bobinei. În cazul în care cursorul se află la capătul A al bobinei, tensiunea de alimentare a receptorului este nulă. Aceasta crește pe măsură ce cursorul se apropie de capătul B , cînd devine maximă.

Evident, la poziția dată a cursorului tensiunea la bornele receptorului depinde de rezistența acestuia.

Potențiometrul se utilizează, de exemplu, la reglarea volumului de sonorizare a aparatelor radioelectronice, a iluminării ecranului televizorului, a aprinderii sau stingerii lente a luminii etc.

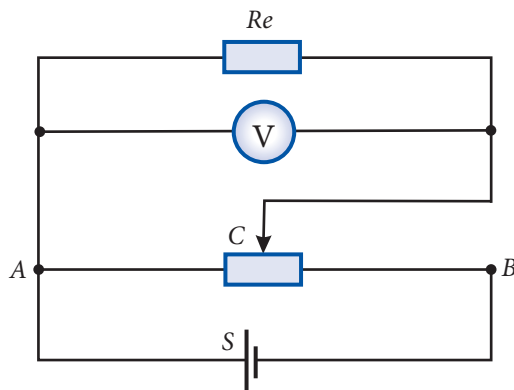


Fig. 5.19

Problemă rezolvată

Se dă:

$$I_m = 2 \text{ A},$$

$$R_0 = 0,02 \, \Omega,$$

$$U = 300 \text{ V},$$

$$I = 10 \text{ A}$$

$$R_a - ?, R_s - ?$$

Un ampermetru școlar are limita superioară $I_m = 2 \text{ A}$ și rezistența $R_0 = 0,02 \, \Omega$. Cum poate fi transformat acest aparat de măsură într-un voltmetru ce poate măsura tensiuni de pînă la 300 V sau într-un ampermetru cu limita de măsurare $I = 10 \text{ A}$?

Cunoscînd rezistența aparatului de măsurat, se poate calcula valoarea căderii de tensiune pe care acesta o poate suporta, adică limita superioară a tensiunii

$$U_m = I_m R_0 = 2 \cdot 0,02 = 0,04 \text{ V.}$$

Pentru utilizarea aparatului de măsură în calitate de voltmetru care măsoară tensiuni de pînă la $U = 300 \text{ V}$, în serie cu el trebuie conectată o rezistență adițională (vezi (5.27))

$$R_a = (n - 1) R_0 = \left(\frac{U}{U_m} - 1 \right) R_0; R_a \approx 150 \Omega.$$

În cazul cînd dorim să lărgim domeniul de măsurare a ampermetrului școlar, acesta se șuntează, adică în paralel cu ampermetrul se leagă un rezistor R_s (vezi (5.26)):

$$R_s = \frac{R_0}{n - 1} = \frac{R_0}{I/I_m - 1}; R_s = 0,005 \Omega.$$

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Cum influențează conectarea ampermetrului asupra valorii intensității curentului prin circuit? Cum poate fi micșorată această influență?
2. Ce condiții trebuie să satisfacă rezistența interioară a voltmetrului pentru a influența cît mai puțin curentul electric prin circuit?
3. Cum poate fi lărgit domeniul de măsurare al ampermetrului? Dar al voltmetrului?
4. Explicați principiul modificării tensiunii electrice cu ajutorul potențiometrului.
5. Determinați raportul dintre rezistența interioară a ampermetrului și cea a șuntului care ar permite lărgirea domeniului de măsurare al ampermetrului de 15 ori.
6. Un ampermetru permite măsurarea intensității curentului electric ce nu depășește $1,5 \text{ A}$. Care trebuie să fie rezistența șuntului conectat la ampermetru pentru a măsura intensități de pînă la 12 A , dacă se știe că rezistența interioară a ampermetrului este egală cu $0,014 \Omega$?
7. Pentru a lărgi domeniul de măsurare al voltmetrului, la acesta a fost conectată o rezistență adițională de 9 ori mai mare decît rezistența proprie a voltmetrului. De cîte ori s-a lărgit domeniul de măsurare al voltmetrului?

5.4*

APARATE ELECTRICE DE MĂSURAT

a.* Caracteristica aparatelor electrice de măsurat și clasificarea lor

Studiul experimental al fenomenelor electrice și magnetice este determinat, în primul rînd, de aparatele electrice de măsurat. Cu ajutorul lor mărimile fizice care descriu aceste fenomene sînt transformate în altele, direct accesibile observatorului. Procesul de stabilire a unei relații dintre mărimea de măsurat și cea vizualizată este numit **etalonare** a aparatului de măsurat, iar calitatea etalonării lui reprezintă o caracteristică importantă numită **precizie**.

Constructiv, aparatele electrice de măsurat se compun din părți fixe și părți mobile, în care mărimea de măsurat produce un cuplu activ de forțe electromagnetice, punînd

în mișcare un ac indicator. Pentru asigurarea unei deplasări lente, el este echilibrat cu ajutorul unui dispozitiv special, care dă naștere unui moment de rotație, ce acționează în sens opus celui produs de cuplul activ de forțe asupra părții mobile. După stabilirea relației dintre unghiul de deviație a acului indicator și valoarea mărimii de măsurat se construiește o scară gradată de pe care se citesc indicațiile aparatului.

Mărimia S egală cu raportul dintre valoarea creșterii deplasării unghiulare a acului indicator $\Delta\alpha$ exprimată în diviziuni și cea a creșterii mărimii de măsurat ΔX se numește sensibilitate a aparatului de măsurat:

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta X} . \quad (5.28)$$

Rezultă că aparatul de măsurat este cu atât mai sensibil cu cât este mai mare creșterea unghiului de deviație pentru una și aceeași creștere a mărimii fizice măsurate. Cu alte cuvinte, sensibilitatea aparatului arată cât de apropiate pot fi două valori distincte ale mărimii fizice măsurate. Dacă intervalul $\Delta\alpha$ este împărțit în N diviziuni, atunci din (5.28) rezultă că mărimea inversă sensibilității

$$C = \frac{1}{S} = \frac{\Delta X}{N}$$

reprezintă **valoarea unei diviziuni**.

De exemplu, microampermetrul din figura 5.20 poate măsura intensități ale curentului de pînă la 100 μA , avînd scara împărțită în 50 de diviziuni, și deci are sensibilitatea $S = 0,5 \text{ div./}\mu A$ și valoarea unei diviziuni $C = 2 \mu A/\text{div}$.

Odată cu dezvoltarea tot mai intensă a electronicii și, mai ales, odată cu miniaturizarea ei, a devenit posibilă construirea aparatelor electrice de măsurat **digitale** (fig. 5.21). În aparatele electrice digitale mărimile fizice măsurate sînt vizualizate cu ajutorul unui **dispozitiv indicator numeric**, compus din blocul de memorie, generatorul de cifre, blocul de iluminare a cifrelor și panoul de indicație. Rezultatele măsurătorilor se acumulează în blocul de memorie și pe măsura necesității sînt transmise mai întîi generatorului, care determină aspectul cifrei (de la 0 pînă la 9), iar mai apoi – blocului de iluminare, care stabilește locul ei în șirul de cifre de pe panoul de indicație.

Aparatele electrice de măsurat pot fi clasificate după următoarele criterii de bază.

După **mărimea de măsurat**: *ampermetre*, pentru măsurarea intensității curentului; *voltmetre*, pentru măsurarea tensiunii; *ohmmetre*, pentru măsurarea rezistenței electrice, *wattmetre*, pentru măsurarea puterii ș.a.

După **natura curentului**: aparate în curent continuu, aparate în curent alternativ, aparate în curent continuu și alternativ.



Fig. 5.20







Fig. 5.21

După **principiul de funcționare**: aparate *magnetoelectrice, feromagnetice, electro-dinamice, termice, de inducție* etc.

După **clasa de precizie**: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Pentru comoditate scala aparatelor electrice de măsurat este înzestrată cu un șir de semne convenționale. Principiul de funcționare este indicat cu unul din cele reprezentate în tabelul de mai jos; natura curentului – cu (–) pentru curentul continuu sau (∼) pentru cel alternativ; poziția aparatului în timpul măsurării – cu (↑) sau (⊥) verticală, cu (→) sau (←) orizontală, cu (∠) înclinată sub un anumit unghi, de exemplu 60°, tensiunea de străpungere a izolației – cu (☆) în interiorul căreia este indicată această tensiune în kV, de exemplu (☆); clasa de precizie – cu valoarea respectivă, de exemplu 1,5.

Principiul de funcționare a aparatului	Semnul convențional	Principiul de funcționare a aparatului	Semnul convențional
Magnetoelectric		Electrodinamic	
Feromagnetic		Termic	

În funcție de necesități, deseori sînt folosite **aparate electrice cu mai multe limite de măsurare și aparate multifuncționale**. Schema electrică a acestora poate fi comutată atît în scopul modificării intervalului de măsurare, cît și în scopul măsurării diferitor mărimi fizice. De exemplu, aparatul electric digital, prezentat în *figura 5.21*, poate măsura în funcție de poziția comutatorului mai multe mărimi fizice: tensiunea și intensitatea curentului atît continuu, cît și alternativ, rezistența electrică și capacitatea electrică cu posibilitatea modificării limitelor de măsurare, precum și coeficientul de amplificare a tranzistoarelor și temperatura.

b.* Erorile aparatelor electrice de măsurat

Datorită frecărilor ce se produc la mișcarea părților mobile, orice aparat de măsurat introduce în măsurătoarea efectuată o anumită eroare. Aceasta reprezintă una dintre cele mai importante caracteristici ale aparatelor electrice de măsurat.

Fie valoarea adevărată a mărimii fizice cercetate este X_0 , iar X este valoarea citită pe scala aparatului la măsurarea ei. Atunci modulul diferenței lor

$$\Delta X = |X - X_0| \quad (5.29)$$

este numit **eroare absolută** a aparatului de măsurat, iar raportul dintre eroarea absolută și **calibrul scalei** (valoarea maximă X_{\max} care poate fi citită pe scala aparatului)

$$\varepsilon = \frac{\Delta X}{X_{\max}} \quad (5.30)$$

se numește **eroare relativă** a acestuia.

Eroarea relativă exprimată în procente corespunde **clasei de precizie** a aparatului electric de măsurat, indicată pe scala lui.

Dacă se cunoaște clasa de precizie a aparatului și calibrul scalei, atunci din (5.30) se determină ușor eroarea absolută a măsurării

$$\Delta X = \varepsilon X_{\max}, \quad (5.31)$$

care este independentă de valoarea citită, adică nu depinde de poziția acului indicator. Din (5.31) rezultă că eroarea absolută este cu atât mai mică, cu cât clasa de precizie a aparatului utilizat este mai mică. Aparatele care au clasa de precizie subunitară, adică 0,1; 0,2; 0,5, sînt folosite la măsurări precise și se numesc **aparate de precizie**. În tehnică însă se utilizează aparate mai puțin precise avînd clasa 1; 1,5; 2,5; 4, cele mai uzuale fiind aparatele de clasa 1,5 sau 2. Majoritatea aparatelor folosite în laboratoarele școlare au clasa de precizie 2,5.

Să analizăm un exemplu de calcul al erorii absolute. Un voltmetru, prevăzut cu borne de ieșire ce corespund calibrelor 3 V, 15 V și 45 V, are clasa de precizie 2, adică $\varepsilon = 0,02$ și scala gradată de la 0 la 15 (fig. 5.22). Fiind conectat într-un circuit la borna de ieșire ce corespunde calibrei 3 V, acul indicator s-a abătut la gradația 12. În acest caz valoarea unei diviziuni este de 0,2 V, iar conform relației (5.31), eroarea absolută de citire a tensiunii constituie $\Delta U = 0,02 \cdot 3 \text{ V} = 0,06 \text{ V}$. Astfel, tensiunea citită este $U = (2,40 \pm 0,06) \text{ V}$.

Dacă însă pentru măsurarea acestei tensiuni vom folosi calibrele 15 V, atunci valoarea unei diviziuni este de 3 V, acul indicator se abate în limitele unei diviziuni, iar eroarea absolută devine mult mai mare: $\Delta U = 0,02 \cdot 15 \text{ V} = 0,3 \text{ V}$. Așadar,

pentru micșorarea erorii de citire a indicațiilor aparatelor electrice de măsurat este necesară utilizarea unui astfel de calibru ce corespunde celei mai mari deviații a acului indicator.

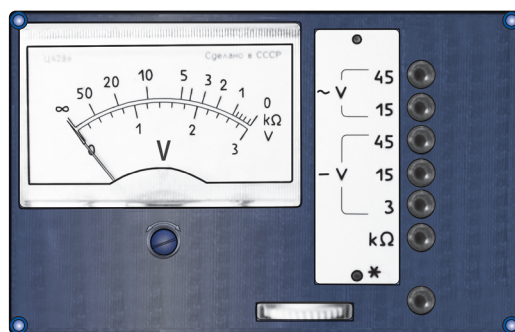


Fig. 5.22

Dacă pe scala aparatului de măsurat nu este indicată clasa de precizie, atunci eroarea absolută de citire a indicației lui se ia egală cu jumătate din valoarea celei mai mici diviziuni. De exemplu, un miliampermetru de calibru 150 mA, avînd pe scală 50 de diviziuni, este caracterizat de o eroare absolută $\Delta I = 0,5 \cdot (150 \text{ mA} : 50) = 1,5 \text{ mA}$.

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Ce reprezintă procesul de etalonare a unui aparat de măsurat?
2. După care criterii se clasifică aparatele electrice de măsurat?
3. Cum se definește sensibilitatea unui aparat de măsurat? Ce reprezintă valoarea unei diviziuni a acestuia?
4. Ce reprezintă eroarea absolută a aparatului electric de măsurat? Dar cea relativă?
5. Care este relația de legătură dintre eroarea relativă și clasa de precizie?
6. Cum trebuie efectuată o măsurare pentru a avea o eroare de citire a indicațiilor cât mai mică?
7. Cum se calculează eroarea absolută cînd pe scala aparatului nu este indicată clasa de precizie?

DETERMINAREA REZISTENȚEI INTERNE ȘI A T.E.M. A UNEI SURSE DE TENSIUNE

Scopul lucrării:	Studiul experimental al legii lui Ohm pentru un circuit simplu și măsurarea t.e.m. și a rezistenței interne a unei surse de tensiune.
Aparate și materiale necesare:	sursă de tensiune, reostat sau rezistență variabilă, ampermetru, voltmetru, întrerupător, fire de conexiune.

Considerații teoretice

Dacă un voltmetru se conectează la bornele sursei de tensiune, atunci indicația lui U_V diferă de valoarea t.e.m. a acesteia. Într-adevăr,

$$U_V = IR_V,$$

unde R_V este rezistența internă a voltmetrului. Luînd în considerare legea lui Ohm pentru un circuit simplu (5.19), din relația precedentă avem:

$$U_V = \frac{\mathcal{E}}{R_V + r} \cdot R_V. \quad (5.32)$$

Astfel, cu cît R_V este mai mică decît r , cu atît U_V se deosebește mai mult de \mathcal{E} . De obicei, rezistența internă a sursei de tensiune este foarte mică, iar cea a voltmetrului – mare, astfel încît, practic, întotdeauna $R_V \gg r$. După cum rezultă din (5.32), în asemenea situații voltmetrul indică valoarea aproximativă a t.e.m., adică $U_V \approx \mathcal{E}$. Din legile lui Ohm pentru o porțiune de circuit (5.6) și pentru un circuit simplu care conține o rezistență R (5.19), rezultă:

$$U = \mathcal{E} - Ir. \quad (5.33)$$

Se observă că dependența $U = f(I)$ este **liniară** (fig. 5.23), însă trebuie să menționăm că în realitate, pentru valori mari ale intensității curentului (aproprate de cea a intensității de scurtcircuit) ea devine **neliniară**. Aceasta se datorează modificării în acest caz atît a t.e.m. \mathcal{E} , cît și a rezistenței interne r ale sursei de tensiune.

Pentru două valori arbitrare ale tensiunii de pe porțiunea liniară (fig. 5.23) din (5.33) avem:

$$U_1 + I_1 r = U_2 + I_2 r,$$

de unde

$$r = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1} = - \frac{\Delta U}{\Delta I}. \quad (5.34)$$

Așadar, rezistența internă a sursei de tensiune este determinată de panta graficului. Din grafic și din relația (5.33) se mai observă că valoarea tensiunii obținută la intersecția axei ordonatelor cu prelungirea porțiunii liniare a graficului ($I = 0$) coincide cu t.e.m. Această valoare este echivalentă cu cea care s-ar obține la măsurarea t.e.m. a sursei de tensiune cu un voltmetru de rezistență internă infinită. Dacă se prelungște graficul pînă la intersecția cu axa absciselor ($U = 0$), atunci valoarea obținută a intensității curentului este echivalentă cu cea a intensității de scurtcircuit $I_{s.c.}$ (fig. 5.23).

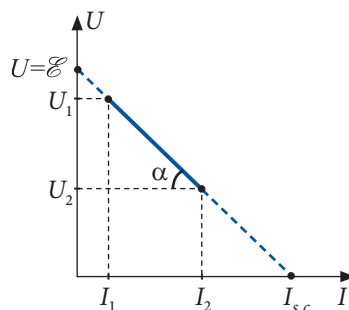


Fig. 5.23

Modul de lucru:

1. Măsurăți $t.e.m.$ \mathcal{E}_0 a sursei de tensiune, conectînd voltmetrul direct la bornele ei.
2. Realizați montajul din *figura 5.24* și deplasați cursorul reostatului în poziția cu rezistență maximă.
3. Închideți întrerupătorul K și deplasînd cursorul reostatului pe o distanță de aproximativ $3/4$ din lungimea lui, citiți valorile tensiunii U și intensității curentului I pentru cel puțin cinci poziții ale cursorului.
4. Introduceți datele experimentale în tabelul de mai jos.

Nr. crt.	U (V)	I (A)	\mathcal{E}_0 (V)	R (Ω)	\mathcal{E} (V)	$I_{s.c.}$ (A)
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						

5. Construiți pe hîrtie milimetrică graficul tensiunii U în funcție de intensitatea curentului I și determinați rezistența internă a sursei de tensiune, calculînd cu ajutorul relației (5.34) panta dreptei obținute.
6. Prolungați porțiunea liniară a graficului pînă la intersecția cu axele de coordonate și determinați $t.e.m.$ \mathcal{E} a sursei de tensiune și valoarea intensității de scurtcircuit $I_{s.c.}$. Comparați valoarea căpătată din grafic a $t.e.m.$ \mathcal{E} cu cea obținută la măsurarea directă \mathcal{E}_0 .
7. Trageți concluziile privind rezultatele obținute.

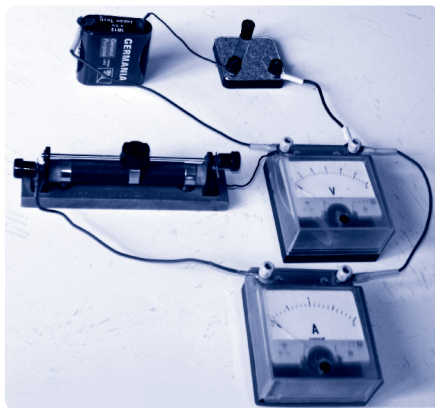


Fig. 5.24

ÎNTREBĂRI

1. Care sînt legile lui Ohm pentru o porțiune de circuit și pentru un circuit simplu?
2. Cum trebuie să fie rezistența internă a voltmetrului? Explicați.
3. De ce se recomandă folosirea minim a $3/4$ din lungimea reostatului, adică excluderea rezistențelor mici?

Lucrarea de laborator**2*****DETERMINAREA REZISTIVITĂȚII UNUI CONDUCTOR**

Scopul lucrării:	Determinarea experimentală a rezistivității unui conductor metalic cu ajutorul ampermetrului și al voltmetrului.
Aparate și materiale necesare:	sursă de tensiune, reostat, ampermetru, voltmetru, potențiometru cu fir, șuler sau micrometru, întrerupător, fire de conexiune.

Considearații teoretice

Pentru determinarea rezistivității vom folosi potențimetrul cu fir. Acesta reprezintă un dispozitiv care constă dintr-un fir metalic întins și un contact care alunecă de-a lungul lui. Firul metalic dintr-un material cu rezistivitate mare (fecral, nicrom, constantan, nichelină) și contactul alunecător sînt instalate pe o bară de lemn prevăzută cu diviziuni milimetrice.

Pentru reglarea intensității curentului prin conductorul cercetat AB , în circuit (fig. 5.25) se introduce reostatul R , iar lungimea conductorului l se modifică deplasînd contactul alunecător C .

Folosind relația (5.8) și expresia matematică a legii lui Ohm pentru o porțiune de circuit (5.7), rezistivitatea conductorului

$$\rho = \frac{RS}{l} = \frac{US}{Il}.$$

Aria secțiunii transversale a conductorului se exprimă prin diametrul lui $S = \pi d^2/4$. Astfel, pentru rezistivitate obținem:

$$\rho = \frac{\pi U d^2}{4 I l}. \quad (5.35)$$

Notă. În lipsa potențimetrului cu fir se poate utiliza orice alt conductor dintr-un material cunoscut, de exemplu, cupru. În acest caz este necesar să luăm o lungime mare a conductorului (cel puțin 20 m). Se înfășoară conductorul pe un obiect și se introduce în circuitul din figura 5.25. După efectuarea primei măsurări, din conductor se taie 2–4 m și se repetă măsurările încă de două sau mai multe ori pentru alte lungimi. Dacă lungimea conductorului este mică (~ 1 m), atunci pentru înregistrarea tensiunii la capetele conductorului trebuie utilizat un milivoltmetru.

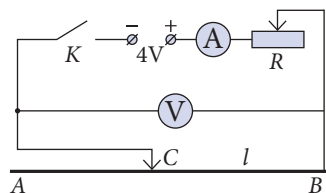


Fig. 5.25

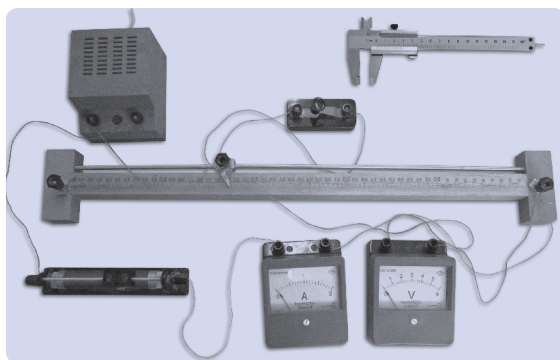


Fig. 5.26

Modul de lucru:

1. Realizați montajul din figura 5.26 în conformitate cu schema electrică (fig. 5.25).
2. Deplasați contactul alunecător C astfel, încît să excludeți conductorul AB din circuit, adică $l = 0$ (fig. 5.25). Închideți întrerupătorul K și cu ajutorul reostatului reglați curentul din circuit, încît intensitatea lui să fie de aproximativ 0,5 A. Întrerupeți circuitul.
3. Deplasați contactul alunecător C astfel, încît să introduceți în circuit toată lungimea conductorului $l = AB$. Închideți întrerupătorul și înregistrați indicațiile ampermetrului și voltmetrului.
4. Repetați procedeele de lucru de la pct. 3, deplasînd contactul alunecător în alte cel puțin două poziții, asigurînd în așa mod și alte lungimi ale firului metalic.
5. Măsurați cu șublerul sau cu micrometrul diametrul d al conductorului.
6. Calculați cu ajutorul relației (5.35) rezistivitatea conductorului metalic studiat.
7. Estimați erorile (absolută și relativă) ale determinării rezistivității, folosind relațiile

$$\varepsilon = \frac{\Delta \bar{\rho}}{\bar{\rho}} = \frac{\Delta \pi}{\pi} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{2 \Delta d}{d}; \quad \Delta \bar{\rho} = \varepsilon \cdot \bar{\rho}.$$

8. Introduceți rezultatele măsurărilor și ale determinărilor în tabelul de mai jos.

Nr. crt.	l (m)	I (A)	U (V)	d (10^{-3} m)	ρ ($10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$)	$\Delta \rho$ ($10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$)	ε (%)
1.							
2.							
3.							
...							
Val. med.							

9. Prezentați rezultatul sub forma $\rho = (\bar{\rho} \pm \Delta \bar{\rho}) \Omega \cdot \text{m}$; $\varepsilon = \dots\%$.

10. Formulați concluziile privind rezultatul obținut și comparați-l cu valoarea tabelară.

ÎNTREBĂRI

1. Cum depinde rezistența unui conductor de dimensiunile sale geometrice și de natura materialului din care acesta este confecționat?
2. Ce reprezintă rezistivitatea și care este unitatea ei în SI?
3. Care dintre măsurările efectuate introduce cea mai mare eroare?

5.5

CURENTUL ELECTRIC ÎN METALE

a. Conducția electrică a metalelor

În par. 5.1 s-a menționat că purtătorii liberi de sarcină electrică în metale sînt **electronii liberi** – electronii de valență care, fiind legați mai slab de atomi, se rup de aceștia și se colectivizează.

Primul pas spre stabilirea acestui model a metalului a fost făcut în 1898 de fizicianul german E. Ricke (1845–1915). În 1901, el a realizat un experiment important: un curent electric cu intensitatea de circa 10 A a circulat timp îndelungat prin conductoare din metale diferite, puse în contact nemijlocit. Nu s-a constatat pătrunderea reciprocă a metalelor unul în altul mai mult decît cea condiționată de difuziune. Astfel, s-a demonstrat în mod direct că atomii nu participă la transportarea sarcinii electrice prin conductoare metalice.

Următorul pas în elaborarea teoriei conducției electrice a metalelor a fost făcut, în 1900, de fizicianul german Paul Drude (1863–1906), care a presupus că în lipsa cîmpului electric exterior, electronii liberi din metal se mișcă haotic, formînd un **gaz electronic**. Dacă însă conductorul se află în cîmp electric exterior, asupra lui acționează forțe electrice care imprimă electronilor accelerație și ei efectuează o mișcare ordonată care se suprapune pe cea haotică. Anume mișcarea ordonată a electronilor și reprezintă curentul electric.

Faptul că anume electronii sînt purtători liberi de sarcină în metale a fost demonstrat în mod direct în experiența realizată, în 1916, de fizicianul american R. Tolman (1881–1948) și chimistul american T. Stewart (1890–1958). Pe un ax a fost fixată o bobină, care avea un număr mare de spire de sîrmă. Capetele sîrmei

erau sudate la două discuri metalice izolate unul de altul și fixate pe același ax cu bobina (fig. 5.27). De discuri se atingeau permanent două lamele unite prin conductoare de legătură cu un galvanometru sensibil. Axul, împreună cu bobina și discurile de pe el, era pus în rotație rapidă, apoi oprit brusc. Purtătorii de sarcină însă își continuau mișcarea în virtutea inerției. Ca urmare, în circuit exista un curent electric de scurtă durată. În cadrul experimentului au fost stabilite semnul purtătorilor de sarcină, raportul dintre sarcina electrică și masa purtătorilor respectivi. Acestea s-au dovedit a fi egale cu indicii determinați pe alte căi pentru electron. Prin experimentul Tolman–Stewart, problema privind natura purtătorilor liberi de sarcină electrică din metale a fost rezolvată definitiv.

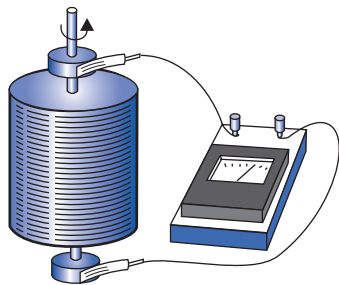


Fig. 5.27

b.* Legea lui Ohm în teoria electronică a metalelor

Să stabilim relația dintre intensitatea curentului electric și viteza medie a mișcării ordonate a electronilor liberi. Considerăm o porțiune de conductor metallic de lungime l și aria secțiunii transversale S (fig. 5.28). Dacă n este concentrația electronilor liberi, atunci numărul lor în volumul $V = lS$ al acestei porțiuni $N = nV = nlS$. Sarcina unui electron este egală cu sarcina elementară e , iar sarcina acestor electroni $q = Ne = nelS$.

Notăm cu v viteza medie a mișcării orientate a electronilor. Aceștia, în mișcarea lor orientată, parcurg distanța l în timpul $t = l/v$. În acest interval de timp toți electronii liberi aflați în spațiul dintre secțiuni traversează secțiunea 1 a conductorului, adică secțiunea este străbătută de sarcina negativă de valoare egală cu q . Aceasta este echivalentă cu sarcina pozitivă de aceeași valoare q , care străbate secțiunea 2.

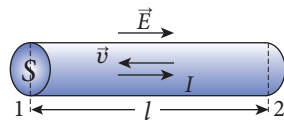


Fig. 5.28

Intensitatea curentului

$$I = \frac{q}{t} = neSv. \quad (5.36)$$

Să calculăm viteza medie v . Câmpul electric omogen de intensitate E acționează asupra electronilor cu forța de mod \ulcorner l $F = eE$, orientată în sens opus vectorului \vec{E} . Ea imprimă electronului accelerația:

$$a = \frac{F}{m_e} = \frac{eE}{m_e}, \quad (5.37)$$

unde cu m_e este notată masa electronului. Accelerația a este constantă; prin urmare, mișcarea ordonată a electronilor este uniform accelerată. Această mișcare este limitată în timp datorită ciocnirilor electronilor liberi cu ionii metalului dat, precum și cu impuritățile (atomi impropriei) conținuți în metale. Notăm cu τ intervalul mediu de timp dintre două ciocniri succesive ale unui electron. Se admite că la fiecare ciocnire electronul transmite ionului energia cinetică a mișcării ordonate și după fiecare ciocnire această mișcare o reia de la început, adică cu viteza inițială nulă. Așadar, viteza maximă a electronilor atinsă nemijlocit înainte de ciocnire este:

$$v_{\max.} = a\tau = \frac{e\tau}{m_e} E. \quad (5.38)$$

Viteza medie în mișcarea uniform-variată (și numai în această mișcare!) este egală

cu semisuma vitezei inițiale și a celei finale. Obținem:

$$v = \frac{0 + v_{\max}}{2} = \frac{e\tau}{2m_e} E. \quad (5.39)$$

Substituind (5.39) în (5.36), pentru intensitatea curentului avem: $I = \frac{ne^2\tau}{2m_e} ES$.

Exprimăm intensitatea cîmpului electric E prin tensiunea electrică U dintre capetele conductorului și lungimea lui l , anume $E = U/l$. Astfel, intensitatea curentului în conductor este:

$$I = \frac{ne^2\tau}{2m_e} \frac{S}{l} U. \quad (5.40)$$

Am obținut, în cadrul teoriei electronice a metalelor, legea lui Ohm. Comparînd (5.40) cu expresia (5.6) a legii lui Ohm pentru o porțiune omogenă de circuit $I = U/R$, stabilim expresia pentru rezistența conductorului:

$$R = \frac{2m_e}{ne^2\tau} \cdot \frac{l}{S}. \quad (5.41)$$

Astfel, am obținut încă un rezultat important: expresia (5.8) pentru rezistența conductorului, în funcție de dimensiunile sale geometrice, precum și expresia pentru rezistivitatea metalului:

$$\rho = \frac{2m_e}{ne^2\tau}. \quad (5.42)$$

Simpla enumerare a rezultatelor obținute, exprimate de formulele (5.40)–(5.42), demonstrează convingător importanța teoriei electronice a metalelor. Ulterior, această teorie a fost aprofundată și pe baza ei au fost explicate mai multe proprietăți electrice, magnetice, termice și optice ale metalelor. Calculînd energia cinetică maximă transmisă de electroni rețelei cristaline, obținem ușor legea lui Joule.

c.* Legea lui Joule în teoria electronică a metalelor

Mai sus s-a menționat că la ciocnire cu ionii electronul le transmite energia cinetică maximă a mișcării sale ordonate, adică energia $m_e v_{\max}^2/2$. Ca rezultat, energia mișcării termice a ionilor se mărește, temperatura metalului crește, ceea ce corespunde degajării unei cantități de căldură. Să calculăm valoarea acesteia.

În intervalul de timp t electronul exercită t/τ ciocniri, unde τ este intervalul mediu de timp dintre două ciocniri succesive, și transmite ionilor energia egală cu: $\frac{m_e v_{\max}^2}{2} \cdot \frac{t}{\tau}$. În volumul Sl al conductorului se află nSl electroni. Căldura degajată, egală cu suma energiilor cinetice transmise ionilor în timpul t de toți electronii, este:

$$Q = nSl \cdot \frac{m_e v_{\max}^2}{2} \cdot \frac{t}{\tau}.$$

Substituind expresia (5.38) pentru viteza maximă a electronilor în mișcarea ordonată și luînd în considerare relația $E = U/l$ dintre intensitatea cîmpului electric E și tensiunea U de la capetele conductorului, avem:

$$Q = \frac{ne^2\tau}{2m_e} \cdot \frac{S}{l} U^2 t.$$

Ținînd seama de expresia (5.41) pentru rezistența conductorului, obținem:

$$Q = \frac{U^2}{R} t = I^2 R t,$$

adică forma cunoscută (5.16) a legii lui Joule.

d. Dependența rezistivității metalelor de temperatură

În expresia (5.42) pentru rezistivitatea metalului figurează sarcina elementară e și masa electronului m_e – constante universale. De temperatură depind: concentrația electronilor n și intervalul mediu de timp τ dintre două ciocniri succesive ale electronului cu ionii metalului.

Concentrația n depinde de temperatură datorită variației volumului prin dilatare termică. La încălzire volumul conductorului se mărește; prin urmare, numărul de electroni ce revin la o unitate de volum – concentrația n – se micșorează. Dar coeficienții dilatării termice a metalelor au valori mici de ordinul 10^{-5} K^{-1} . În acest caz, volumul conductorului crește cu 1%, deci concentrația n se micșorează cu 1% la încălzirea cu circa 1 000 K. Prin urmare, concentrația n rămîne efectiv constantă în intervale mari de temperaturi (de sute de kelvini).

Mult mai tare depinde de temperatură timpul mediu τ dintre ciocnirile succesive ale electronilor. La ridicarea temperaturii metalului, oscilațiile ionilor din nodurile rețelei cristaline devin mai intense, amplitudinile oscilațiilor sînt mai mari. În consecință, ciocnirile dintre electronii liberi și ioni devin mai frecvente, durata medie τ dintre ciocnirile succesive se micșorează. După cum se observă din formula (5.42), **rezistivitatea metalului la încălzire se mărește.**

Cercetări detaliate arată că rezistivitatea crește liniar cu temperatura. Notăm cu ρ_0 rezistivitatea metalului la 0°C , cu ρ – rezistivitatea la temperatura t , adică la încălzirea cu t grade. Variația absolută a rezistivității la această încălzire este egală cu $(\rho - \rho_0)$, iar cea relativă – cu $\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$. Experimentele arată că $\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \sim t$. Trecînd la egalitate, introducem un coeficient de proporționalitate α și scriem:

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \alpha t. \quad (5.43)$$

Coeficientul α este numit **coeficient de temperatură al rezistivității** și depinde de natura metalului. Din (5.43) pentru unitatea lui avem $[\alpha] = \text{K}^{-1}$.

Pentru majoritatea metalelor coeficientul α are valori de aproximativ $0,004 \text{ K}^{-1}$. Această valoare este mult mai mare decît coeficientul dilatării termice (10^{-5} K^{-1}), ceea ce confirmă afirmația de mai sus că variația dimensiunilor conductorului prin dilatare termică nu influențează esențial dependența rezistivității de temperatură.

Din (5.43) pentru rezistivitatea la temperatura t avem:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t). \quad (5.44)$$

Graficul acestei dependențe este reprezentat în figura 5.29.

Înmulțim ambele părți ale relației (5.44) cu raportul dintre lungimea conductorului și aria secțiunii sale transversale, aproximativ aceleași pentru ambele temperaturi ($l/S \approx l_0/S_0$). Ținînd seama de formula (5.8), obținem expresia pentru rezistența conductorului în funcție de temperatură:

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (5.45)$$

unde R_0 este rezistența conductorului la 0°C , iar R – la temperatura t . Graficul care reprezintă această relație este similar celui din figura 5.29.

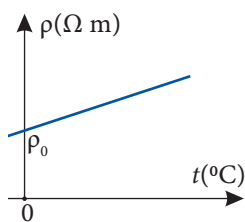


Fig. 5.29

Influența temperaturii asupra rezistenței conductorului poate fi observată în experimentul reprezentat în *figura 5.30*. Asamblăm un circuit electric care conține o sursă de curent S , un bec B (de 6 V) și o porțiune P de spirală din fier, legate în serie. Observăm că becul luminează normal. La încălzirea spiralei constatăm că becul luminează mai slab. Aceasta se explică prin creșterea rezistenței electrice a spiralei, deci și a întregului circuit.

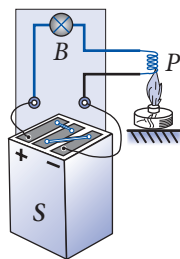


Fig. 5.30

De faptul că rezistența conductorului depinde de temperatură putem să ne convingem măsurînd rezistența filamentului unui bec cu incandescență. Rezistența lui la incandescență este de zeci de ori mai mare decît rezistența filamentului rece.

Referitor la aplicabilitatea legii lui Ohm, constatăm că intensitatea este în funcție liniară de tensiune numai în cazul în care rezistența este constantă.

Circulația curentului electric este însoțită de degajarea unei cantități de căldură, conductorul se încălzește, rezistența lui se mărește. În consecință, intensitatea curentului ia o valoare mai mică decît cea pe care ar fi luat-o în cazul rezistenței constante. Astfel, la tensiuni înalte se observă abateri de la legea lui Ohm (legea proporționalității directe). Graficul intensității, ca funcție de tensiune, are caracterul reprezentat în *figura 5.31*, curba 2.

Dependența rezistenței conductorului metalic de temperatură are aplicare practică la **termometrele cu rezistență**. Partea principală a acestuia o constituie o sîrmuliță de platină, cupru, nichel sau cadmiu, înfășurată pe o carcasă din cuarț sau ceramică. Măsurarea rezistenței sîrmuliței permite determinarea temperaturii cu precizie înaltă pînă la 0,001 K. Termometrele cu rezistență au un avantaj mare. Ele permit determinarea temperaturii în domeniul temperaturilor înalte și joase, în care termometrele cu lichid nu pot fi folosite. Spre exemplu, termometrul cu platină permite măsurarea temperaturilor în intervalul de la -263 pînă la $+1\ 063^{\circ}\text{C}$, iar cel cu sîrmuliță de cupru – de la -50 pînă la circa 180°C .

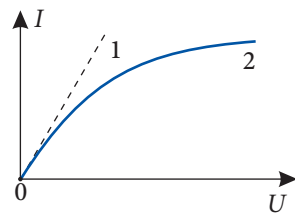


Fig. 5.31

La confecționarea rezistențelor-etalon și a rezistențelor adiționale pentru voltmetre este necesară folosirea unor aliaje a căror rezistivitate realmente nu variază în intervale largi de temperaturi. Un astfel de material este constantanul, un aliaj de cupru și nichel, al cărui coeficient de temperatură al rezistivității este de circa 10^{-5} K^{-1} , adică de cîteva sute de ori mai mic decît la metalele pure.

e.* Supraconductibilitatea

În anul 1908, în laboratorul fizicianului olandez Heike Kamerlingh-Onnes (1853–1926), pentru prima dată a fost obținut heliu în stare lichidă, care la presiune egală cu cea atmosferică normală se condensează la $4,21\text{ K}$. Astfel a fost creată posibilitatea studierii comportării substanței la temperaturi foarte joase.

A fost cercetată, de asemenea, rezistența metalelor în funcție de temperatură. S-a constatat (1911) că rezistența mercurului scade lent la micșorarea temperaturii, în conformitate cu raționamentele expuse în par. 5.5, c. Contrar tuturor așteptărilor, la temperatura de 4,15 K rezistența conductorului de mercur a devenit brusc egală cu zero (fig. 5.32). Temperatura la care rezistența devine nulă a fost numită **temperatura critică** (se notează cu T_c), iar starea substanței la temperaturi mai joase decât T_c , când rezistența ei este nulă, a fost numită **stare supraconductoare**. Despre substanța aflată la temperaturi mai înalte decât T_c , când rezistența ei este diferită de zero, se spune că ea se află în **stare normală**. Proprietatea substanței de a-și micșora brusc (pînă la zero) rezistența a fost numită **supraconductibilitate**, iar substanțele ce posedă această proprietate au fost numite **supraconductoare**.

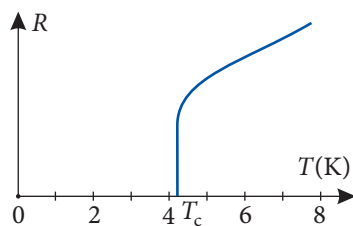


Fig. 5.32

Aproximativ jumătate din metalele pure au fost trecute în stare de supraconductibilitate, cea mai înaltă temperatură critică din ele avînd-o niobiul ($T_c = 9,22$ K). Pe parcursul anilor au fost obținute mai mult de 1 000 de aliaje și compuși intermetalici care posedă proprietatea de supraconductibilitate.

Lipsa rezistenței electrice nu este unica proprietate deosebită a supraconductoarelor. Ele au, de asemenea, proprietăți magnetice specifice. Dacă un metal în stare normală se află în cîmp magnetic exterior, acesta pătrunde în interiorul metalului. La trecerea metalului în stare supraconductoare prin răcire, cîmpul magnetic este eliminat din metal și respins de supraconductor.

Această proprietate poate fi observată introducîndu-se un magnet permanent, suspendat de un fir de ață, în spațiul de deasupra unui vas supraconductor. Se observă, la o distanță dintre magnet și supraconductor, că firul nu mai este tensionat, magnetul levitează, adică plutește liber (fig. 5.33). Experimentul dat este cunoscut sub numele de „Sicriul lui Mahomed” (conform legendei, sicriul lui Mahomed, fondatorul religiei musulmane, levita fără a fi susținut din exterior).

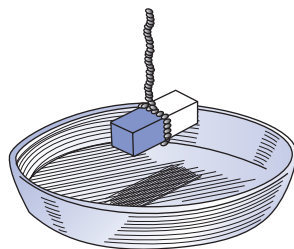


Fig. 5.33

Cîmpurile magnetice puternice distrug însă starea de supraconductibilitate, substanța trece în starea sa normală. Știm din clasa a VIII-a că în jurul conductoarelor parcurse de curent electric există cîmp magnetic. Prin urmare, mărirea intensității curentului electric în cablul supraconductor este însoțită de modificarea respectivă a cîmpului magnetic creat de curent, ceea ce duce, în fine, la trecerea substanței în stare normală și la apariția rezistenței electrice. Astfel, intensitatea curentului în cablul supraconductor este limitată de o anumită valoare critică. Savanții au reușit să sintetizeze substanțe și să confecționeze din ele cabluri supraconductoare prin care pot circula curenți electrice cu intensitatea de circa 7 500 A.

Aplicațiile practice ale supraconductoarelor sînt diverse. În electroenergetică, cablurile supraconductoare pot transmite fără pierderi energia electrică la distanțe mari. În inele supraconductoare pot exista timp îndelungat curenți electrici de intensitate mare, a căror energie se utilizează apoi pe măsura necesității. Înfășurările supraconductoare ale electromagneților permit obținerea unor cîmpuri magnetice intense, solicitînd instalații de dimensiuni considerabil mai mici decît ale celor cu bobine din conductoare obișnuite. Folosirea supraconductoarelor asigură creșterea esențială a vitezei de operare a calculatoarelor electronice.

În mai multe țări se efectuează cercetări vizînd utilizarea în transportul feroviar a „pernei magnetice”, cum este numită în acest caz respingerea magnetică. Vagoanele sînt echipate cu magneți supraconductori care le susțin deasupra liniei de cale ferată. Primul model a fost construit în anii '70 ai secolului XX în Japonia (fig. 5.34). Un vagon cu masa de 2 000 kg și dimensiunile $4 \times 1,5 \times 0,8$ m se deplasa cu viteza de 50 km/h pe o cale ferată lungă de 400 m. Se consideră că transportul cu „pernă magnetică” (fără roți!) se poate mișca cu viteza de pînă la 500 km/h.

Aplicațiile în practică ale supraconductoarelor sînt încă limitate, deoarece necesită temperaturi foarte joase, obținute cu ajutorul heliului lichid, care este destul de costisitor. În atenția savanților se află problema supraconductibilității la temperaturi înalte de cel puțin 100 K, care pot fi obținute cu ajutorul azotului lichid, disponibil în cantități mari și mult mai ieftin. Primele rezultate promițătoare au fost obținute în 1986 de

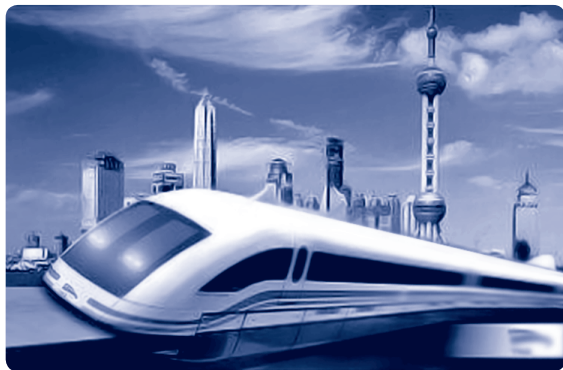


Fig. 5.34

fizicianul german Johannes Bednorz și fizicianul elvețian Karl Müller, care au sintetizat un material ceramic (oxid de lantan, bariu și cupru), ce devine supraconductor la $T_c = 35$ K. Au urmat cercetări intense și, prin înlocuirea lantanului cu itriu, a fost realizat un supraconductor cu $T_c = 98$ K. Materialele în cauză sînt însă fragile și aplicarea lor în practică este dificilă. Cercetările continuă.

Supraconductibilitatea a fost explicată în cadrul teoriei elaborate în 1957 de fizicienii John Bardeen, Leon Cooper și John Schrieffer în SUA și, independent, de Nikolai Bogoliubov în Uniunea Sovietică. S-a constatat că supraconductibilitatea prezintă manifestarea la nivel macroscopic a legiților fizicii cuantice, care se manifestă și în lumea atomilor (cu unele dintre ele ne vom familiariza în clasa a XII-a).

În cadrul Academiei de Științe a Moldovei, sub conducerea academicianului Vsevolod Moscalenco (n. 1928), s-au efectuat cercetări în domeniul teoriei supraconductibilității, a fost elaborat un model de supraconductor aplicabil atît în cazul temperaturilor joase, cît și în cel al temperaturilor înalte.

Problemă rezolvată

1

Se dă:

$$S = 0,8 \text{ mm}^2,$$

$$I = 6 \text{ A},$$

$$\rho = 2,7 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3},$$

$$M = 27 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

$$v = ?$$

SI:

$$8 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$$

$$\text{m/s}$$

Printr-un conductor de aluminiu cu aria secțiunii transversale $S = 0,8 \text{ mm}^2$ circulă un curent de 6 A . Determinați viteza medie a mișcării ordonate a electronilor, considerînd că fiecare atom de aluminiu din acest conductor conține cîte un electron liber. Densitatea și masa molară ale aluminiului sînt $\rho = 2,7 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ și $M = 27 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$.

Rezolvare

Determinăm viteza medie a mișcării ordonate a electronilor din relația pentru intensitatea curentului (5.36) prin porțiunea de conductor cu lungimea l și aria secțiunii transversale S . Avem:

$$v = \frac{I}{neS},$$

unde $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ reprezintă sarcina electronului, iar $n = \frac{N}{V} = \frac{N}{lS}$ este concentrația electronilor exprimată prin numărul lor N în unitatea de volum $V = lS$.

Conform condițiilor problemei, numărul de electroni este egal cu cel al atomilor din porțiunea de conductor cercetată. Din relația pentru cantitatea de substanță $\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}$ avem:

$$N = \frac{m}{M} N_A,$$

iar pentru concentrația electronilor egală cu cea a atomilor

$$n = n_a = \frac{N}{V} = \frac{m}{MV} N_A = \frac{\rho N_A}{M},$$

unde ρ și M sînt densitatea și masa molară ale aluminiului, iar $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ este numărul lui Avogadro.

Astfel, pentru viteza medie a mișcării ordonate a electronilor obținem:

$$v = \frac{IM}{\rho e N_A S} = \frac{6 \cdot 27 \cdot 10^{-3}}{2,7 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 8 \cdot 10^{-7}} \approx 0,78 \frac{\text{mm}}{\text{s}}.$$

Problemă rezolvată

2

Se dă:

$$R_A = 0,02 \Omega,$$

$$R_0 = 20 \Omega,$$

$$I_0 = 2 \text{ A},$$

$$t^\circ = 60^\circ\text{C},$$

$$\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$I = ?$$

O bobină din sîrmă de cupru, un ampermetru și o sursă de curent cu rezistența interioară neglijabilă sînt legate în serie și formează un circuit închis. Rezistența ampermetrului $R_A = 0,02 \Omega$, iar cea a bobinei la temperatura 0°C este de 20Ω . Intensitatea curentului prin circuit la această temperatură $I_0 = 2 \text{ A}$. Care va fi indicația ampermetrului în cazul cînd bobina are temperatura de 60°C . Coeficientul de temperatură al rezistenței pentru cupru $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Întrucît bobina și ampermetrul sînt legate în serie, rezistența exterioară a circuitului la 0°C este $R_0 + R_A$, iar la temperatura de 60°C – $R + R_A$, unde $R = R_0(1 + \alpha t)$ reprezintă rezistența bobinei la temperatura t , R_0 – rezistența acesteia la 0°C , iar α – coeficientul de temperatură al rezistenței. Ținînd seama de faptul că rezistența interioară a sursei de curent se neglijează, legea lui Ohm în cazul temperaturilor 0°C și t° are forma:

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R_0 + R_A} \text{ și } I = \frac{\mathcal{E}}{R + R_A}.$$

Eliminînd *t.e.m.* \mathcal{E} din aceste două ecuații și luînd în considerare dependența rezistenței R de temperatură, pentru intensitatea curentului indicată de ampermetru obținem:

$$I = \frac{R_0 + R_A}{R + R_A} I_0 = \frac{R_0 + R_A}{R_0(1 + \alpha t) + R_A} I_0 = \frac{(20 + 0,02) 2}{20(1 + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot 60) + 0,02} \approx 1,59 \text{ A}.$$

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Care este esența experienței Tolman–Stewart?
- 2.*La închiderea unui circuit electric simplu format dintr-o sursă de curent, un bec și un ampermetru, valoarea intensității indicată de aparat inițial este mai mare, apoi se micșorează. Cum explicați această schimbare? Construiți graficul calitativ al intensității în funcție de timp.
- 3.*Ce factori determină dependența rezistivității de temperatură? Care din ei este dominant?
4. Cum funcționează termometrul de rezistență?
- 5.*În ce constă fenomenul de supraconductibilitate?
- 6.*Ce temperatură este numită critică?
- 7.*Cum interacționează supraconductoarele cu cîmpul magnetic? Ce aplicație practică are această interacțiune?
- 8.*Poate circula printr-un cablu supraconductor curent electric de intensitate oricît de mare fără ca el să treacă în stare normală? Argumentați răspunsul.
- 9.*Cunoscînd expresia (5.42) pentru rezistivitate, evaluați intervalul mediu de timp dintre două ciocniri succesive ale electronului din conductorul de cupru. Se cunosc: rezistivitatea cuprului $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ și concentrația electronilor $n = 8,4 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$.
10. Rezistivitatea aluminiului la 20°C este egală cu $2,8 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$. Care este rezistivitatea lui la 0°C ? Dar la 220°C ? Coeficientul de temperatură al rezistivității pentru aluminiu este egal cu $3,9 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.
11. Rezistența filamentului de wolfram al unui bec cu incandescență la 20°C este egală cu $2,5 \Omega$, iar în timpul funcționării becului – cu 30Ω . Care este temperatura filamentului în acest caz? Coeficientul de temperatură al rezistivității wolframului este egal cu $4,8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

5.6

CURENTUL ELECTRIC ÎN SEMICONDUCTOARE

a. Proprietățile electrice ale semiconductoarelor

Cunoaștem deja două feluri de substanțe cu proprietăți electrice diferite: conductoare și izolatoare (dielectrici). Rezistivitatea lor ia valori ce se deosebesc considerabil: la conductoare $\rho_c < 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ și la izolatoare $\rho_i > 10^8 \Omega \cdot \text{m}$.

În natură există substanțe a căror rezistivitate ia valori în intervalul dintre limitele pentru ρ_c și ρ_i . Aceste substanțe sînt **semiconductoarele**. Se consideră că rezistivitatea lor este cuprinsă între $10^{-3} \Omega \cdot m$ și $10^7 \Omega \cdot m$. Din ele fac parte elemente chimice pure, precum siliciul Si, germaniul Ge, seleniul Se ș.a., un șir de compuși chimici: arsenura de galiu GaAs, seleniura de cadmiu CdSe, fosfura de indiu InP, oxizi de Mn, Cu, Co ș.a.

Menționăm de la bun început că proprietățile electrice ale semiconductoarelor depind în mare măsură de condițiile exterioare în care ele se află.

Să cercetăm dependența rezistivității semiconductoarelor de temperatură. Montăm un circuit electric (fig. 5.35) dintr-o sursă de curent, ampermetru și un semiconductor S (de exemplu, o fișie semiconductoare depusă pe un material plastic rezistent la temperaturi înalte sau un cristal de germaniu). Observăm că inițial acul indicator al ampermetrului se află în apropierea diviziunii 0. Încălzirea semiconductorului este însoțită de devierea considerabilă a acului indicator, ceea ce denotă creșterea intensității curentului în circuit.

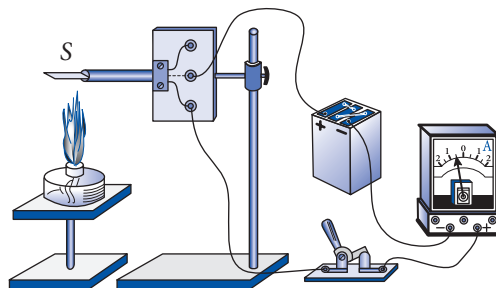


Fig. 5.35

Prin urmare, rezistența, deci și rezistivitatea semiconductoarelor, se micșorează la creșterea temperaturii. Curba 1 din figura 5.36 reprezintă rezistivitatea semiconductorului în funcție de temperatură. Pentru comparație, în aceeași figură este trasată și curba 2, care reprezintă dependența respectivă în cazul conductorului metalic.

Conducția electrică a semiconductoarelor este influențată, de asemenea, de iluminarea lor. Montăm un circuit similar celui din figura 5.35, folosind un semiconductor care se află într-o cutie cu pereți opaci. În cazul cutiei închise, acul indicator se află în vecinătatea diviziunii 0 a scalei ampermetrului. Cutia se deschide și semiconductorul este iluminat de o sursă de lumină intensă. Se observă o creștere considerabilă a intensității curentului în circuit. Conchidem că rezistivitatea semiconductorului este în funcție de iluminarea lui, micșorîndu-se la creșterea iluminării.

Aceste proprietăți deosebite ale semiconductoarelor sînt utilizate pe larg în practică în sisteme de dirijare automată a diferitor procese, la măsurarea temperaturii și a iluminării ș.a.

Termorezistorul, numit și **termistor**, este dispozitivul semiconductor, la baza funcționării căruia se află dependența rezistenței de temperatură. În figura 5.37 este reprezentată schema principală a funcționării unei instalații care menține temperatura încăperii într-un interval îngust de valori, de exemplu, în incubator sau într-un depozit special.

Instalația conține două circuite electrice. Circuitul I este format din sursa de curent S_1 , dispozitivul de încălzire D și o lamă elastică L din oțel avînd capătul O fixat rigid, iar altul atingîndu-se de o tijă conductoare. Circuitul II are în componența sa sursa de

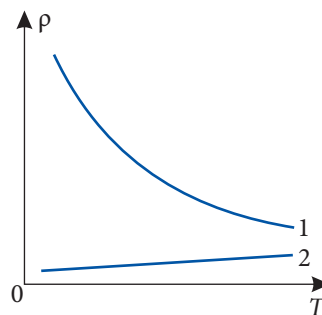


Fig. 5.36

curent S , termorezistorul T și electromagnetul E . În cazul în care temperatura în încăperea se apropie de limita superioară admisibilă, rezistența termistorului T devine mică, intensitatea curentului în circuitul II devine mai mare, astfel încât electromagnetul E atrage lama L și întrerupe circuitul I. Dispozitivul de încălzire este deconectat. La răcire rezistența termistorului T se mărește, intensitatea curentului din circuitul II se micșorează și la un moment electromagnetul E nu mai reține lama elastică. Aceasta se desprinde de electromagnet și închide circuitul I. Dispozitivul de încălzire este pus în funcțiune ș.a.m.d.

Dispozitivele care funcționează în baza dependenței rezistenței semiconductorului de iluminare sînt numite **fotorezistoare**. Schema instalației care se folosește la dirijarea automată a iluminării stradale este similară celei din figura 5.37, în care dispozitivul de încălzire D este înlocuit cu o rețea de becuri electrice, iar termorezistorul T – cu un fotorezistor (lumina emisă de becuri nu trebuie să cadă direct pe el). Dimineața lumina solară incidentă pe fotorezistor provoacă micșorarea rezistenței acestuia, ceea ce implică creșterea intensității curentului prin bobina electromagnetului, atragerea lamei elastice L și întreruperea circuitului de iluminare. Seara, cînd se lasă întunericul, procesul derulează în sens invers și becurile se aprind.

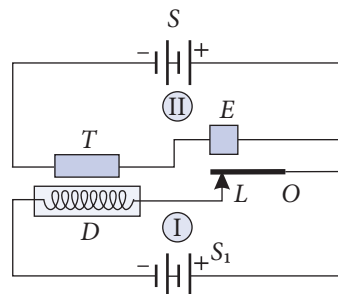


Fig. 5.37

b. Purtătorii liberi de sarcină electrică în semiconductoare. Conducția intrinsecă

Pentru a explica proprietățile descrise mai sus ale semiconductoarelor, să analizăm structura internă a acestora, să stabilim natura purtătorilor liberi de sarcină din ele. Considerăm, de exemplu, un cristal de siliciu. Atomii săi sînt tetravalenți. Fiecare atom din cristal are patru atomi vecini, care sînt situați în vîrfurile unui tetraedru, în al cărui centru se află atomul considerat (fig. 5.38). Legătura dintre atomi este covalentă, fiecărei legături revenindu-i cîte doi electroni: cîte unul din electronii de valență de la fiecare atom. Pentru simplitate înlocuim tabloul spațial al aranjării atomilor și al legăturilor dintre ei cu o imagine plană (fig. 5.39).

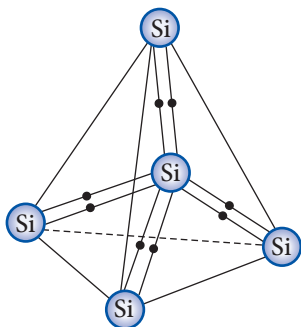


Fig. 5.38

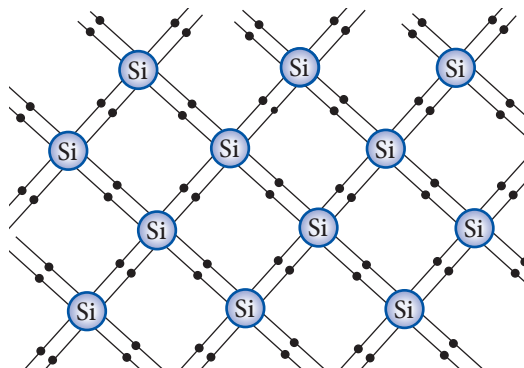


Fig. 5.39

La temperaturi joase electronii nu pot părăsi legăturile, cristalul nu posedă purtători liberi de sarcină electrică, el este, efectiv, un izolator. La încălzirea cristalului agitația termică a particulelor devine mai intensă, energiile cinetice se măresc. Unii electroni părăsesc legăturile covalente și devin liberi, numiți **electroni de conducție**. Se notează cu n , simbolul grafic este \bullet .

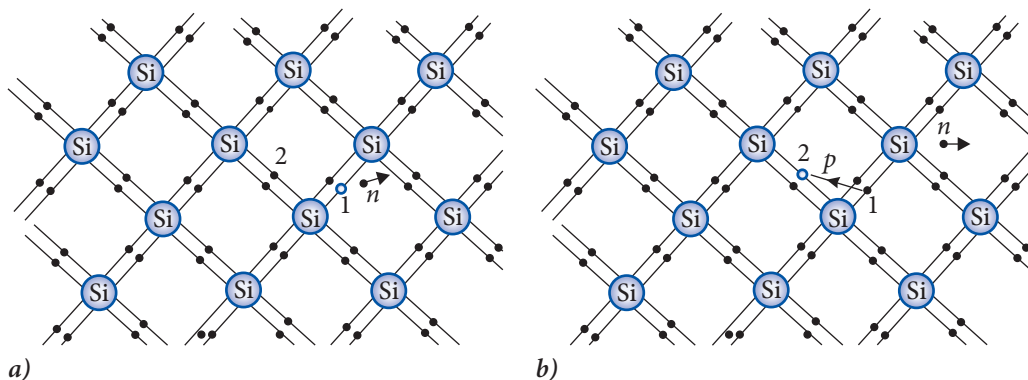


Fig. 5.40

Aceștia nu sînt însă unicii purtători liberi de sarcină electrică în semiconductoare. Locurile în care se află legăturile părăsite de electroni rămîn încărcate cu sarcină electrică pozitivă și sînt numite **goluri** (fig. 5.40, a). Se notează cu p , simbolul grafic este \circ . Legăturile părăsite pot fi ocupate de electroni de pe legăturile vecine, în locurile respective formîndu-se goluri încărcate cu sarcină pozitivă (în fig. 5.40, a golul se afla pe legătura 1, în fig. 5.40, b acest loc este ocupat de electronul care se afla pe legătura 2, unde a apărut un gol). Astfel, deplasarea electronilor de pe o legătură pe cea liberă este însoțită de deplasarea în sens opus a golului încărcat pozitiv. Acest proces se produce continuu.

Conchidem că în semiconductoare există două feluri de purtători liberi de sarcină electrică: **electronii de conducție** și **golurile**. În cristalul pur, acești purtători se află în cantități egale.

În lipsa cîmpului electric exterior, purtătorii liberi se mișcă haotic. La introducerea în cîmp electric, golurile, avînd sarcină electrică pozitivă, capătă mișcare ordonată în sensul intensității acestui cîmp, iar electronii de conducție – în sens opus. Conducția electrică a semiconductorului pur este numită **conducție intrinsecă** sau **proprie**.

Mărirea temperaturii semiconductorului este însoțită de creșterea concentrației electronilor de conducție și a golurilor și, drept urmare, rezistivitatea semiconductorului se micșorează. Astfel se explică dependența respectivă de temperatură (curba 1 din fig. 5.36).

Concentrația purtătorilor liberi de sarcină din semiconductor poate fi mărită și prin iluminarea acestuia. În urma acțiunii luminii unii electroni ce realizează legăturile covalente primesc energie suplimentară și le părăsesc. Are loc **efectul fotoelectric intern** (electronii rămîn în interiorul cristalului). În consecință, crește concentrația purtătorilor liberi de sarcină, se micșorează rezistivitatea semiconductorului.

Astfel, se explică proprietățile descrise mai sus (par. 5.6, *a*) ale semiconductoarelor. Menționăm că acestea sînt influențate și de alte radiații incidente, de exemplu, de razele Röntgen, de fluxurile de particule încărcate.

c. Semiconductoare cu impurități. Conducția extrinsecă

Proprietățile electrice ale semiconductoarelor depind substanțial și de impuritățile pe care le conțin, precum și de abaterile de la aranjarea ordonată a atomilor în rețea. Prin impurități se subînțeleg atomii altor elemente chimice, situați în nodurile rețelei cristaline a semiconductorului.

Vom analiza detaliat un caz concret: cristalul de siliciu, unele noduri ale căruia sînt ocupate de atomi de altă valență.

Admitem că într-un nod al rețelei cristaline atomul tetravalent de siliciu este înlocuit de un atom pentavalent de fosfor P (sau de arseniu As, de stibiu Sb etc.). La realizarea legăturilor covalente cu 4 atomi vecini de siliciu participă doar 4 electroni de valență ai atomului de fosfor. Cel de-al cincilea electron este mai slab legat de atomul de fosfor decât

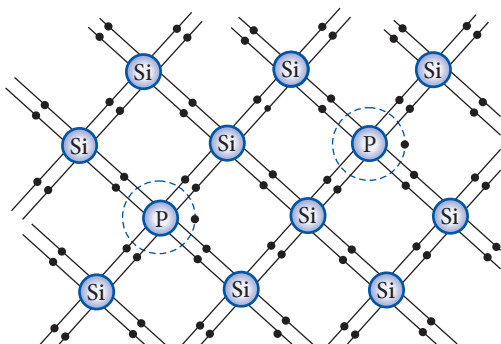


Fig. 5.41

electronii care realizează legăturile covalente (fig. 5.41). Din această cauză el poate părăsi atomul de fosfor la temperaturi mai joase decât cele la care electronii pot părăsi legăturile covalente. Astfel, atomul pentavalent cedează un electron, care devine liber (de conducție). Atomii de acest fel sînt numiți **donori**. Atomul de fosfor, la rîndul său, se transformă în ion pozitiv, care rămîne localizat în nodul respectiv al rețelei.

În consecință, semiconductorul tetravalent cu impurități de atomi pentavalenți conține un număr de electroni de conducție egal cu numărul atomilor de impuritate, transformați în ioni pozitivi. Semiconductorul de acest fel este numit **semiconductor de tip *n* (negativ)**, iar conducția electrică a lui – **conducție extrinsecă de tip *n***.

O altă situație are loc în cazul în care atomul tetravalent de siliciu este înlocuit cu un atom trivalent, de exemplu de indiu In (sau de galiu Ga, bor B etc.). Atomului de impuritate îi lipsește un electron pentru a realiza cele 4 legături covalente cu 4 atomi vecini de siliciu. Pe această legătură poate trece un electron de pe o legătură covalentă dintre doi atomi de siliciu, în locul respectiv apărînd un gol (fig. 5.42). Atomii de impuritate de acest fel sînt numiți **acceptori**. După asocierea unui electron atomul trivalent se transformă în ion negativ, iar pe legătura părăsită de acest electron ia naștere un gol.

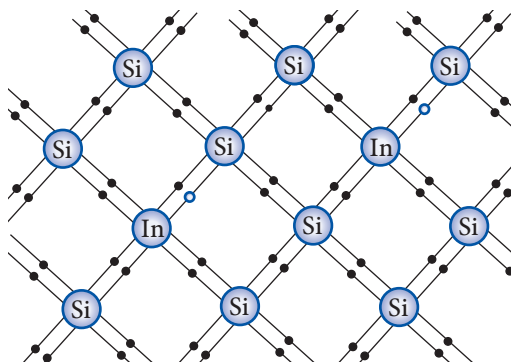


Fig. 5.42

Prin urmare, cristalul tetravalent, care conține în nodurile rețelei sale atomi trivalenți, are un număr de goluri egal cu numărul atomilor trivalenți, ce s-au transformat în ioni negativi. Semiconductorul de acest fel este numit **semiconductor de tip p** (*pozitiv*), iar conducția electrică a unui astfel de semiconductor – **conducție extrinsecă de tip p** .

La creșterea temperaturii semiconductorului cu impurități tot mai mulți electroni părăsesc legăturile covalente devenind liberi, respectiv crește și numărul golurilor. În **semiconductorul de tip n** concentrația electronilor de conducție este mai mare decât a golurilor. **Electronii de conducție** sînt numiți **purtători majoritari** și **golurile – purtători minoritari**. În **semiconductorul de tip p** situația este inversă – **golurile sînt purtători majoritari** și **electronii de conducție – minoritari**. În ambele cazuri diferența dintre concentrațiile purtătorilor majoritari și ale celor minoritari este egală cu concentrația atomilor de impuritate.

La temperaturi și mai înalte concentrația purtătorilor liberi de sarcină devine mult mai mare decât concentrația atomilor de impuritate. Rolul impurităților devine nesemnificativ, semiconductorul cu impurități se comportă ca semiconductorul pur respectiv, iar conducția extrinsecă trece în cea intrinsecă.

d. Joncțiunea $p-n$. Dioda semiconductoare

Să cercetăm funcționarea unui dispozitiv în care se manifestă conducția extrinsecă a semiconductoarelor.

Ne imaginăm două cristale mici, de exemplu de germaniu, care conțin impurități: unul – atomi trivalenți și al doilea – atomi pentavalenți (*fig. 5.43, a*). Primul semiconductor este de tip p , al doilea – de tip n . Atîta timp cît cristalele sînt separate, purtătorii majoritari de sarcină – golurile – în primul cristal și electronii de conducție – în al doilea, sînt distribuiți uniform în volumul fiecărui cristal. Concentrația purtătorilor minoritari este mult mai mică decât a celor majoritari.

Admitem că cristalele sînt puse în contact. În urma fenomenului de difuziune electronii din partea n pătrund în partea p și ocupă legăturile libere, golurile (*fig. 5.43, b*). În consecință, o pereche electron–gol dispare și se reface legătura chimică. Acest proces este numit **recombinare**. Observăm că partea p se încarcă negativ, partea n – pozitiv, în regiunea contactului există un câmp electric care împiedică difuziunea ulterioară a electronilor. Se stabilește o anumită stare de echilibru. În această stare în vecinătatea suprafeței de contact există un strat în care concentrația purtătorilor majoritari este mică. Acest strat,

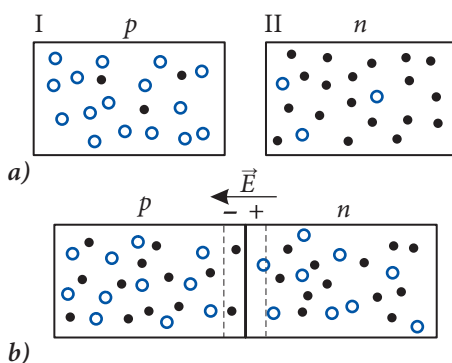


Fig. 5.43

sărăcit de purtători de sarcină, este numit **strat de baraj**. Regiunea de tranziție dintre cele două părți cu impurități de valență diferită este numită **joncțiune $p-n$** .

Să cercetăm proprietățile electrice ale joncțiunii $p-n$. Conectăm joncțiunea într-un circuit electric astfel încît la partea p să fie polul pozitiv, iar la partea n – polul negativ

al sursei (fig. 5.44, a). Electronii din partea n se mișcă spre partea p , golurile din partea p – în sens opus. Concentrația purtătorilor liberi în regiunea suprafeței de contact se mărește, rezistența joncțiunii se micșorează. Acest sens al câmpului electric exterior, deci și al curentului electric prin joncțiune, este numit **sens direct**. La creșterea tensiunii aplicate intensitatea curentului se mărește. Dependența curent–tensiune pentru acest caz este reprezentată în figura 5.45, ramura ce corespunde tensiunii pozitive.

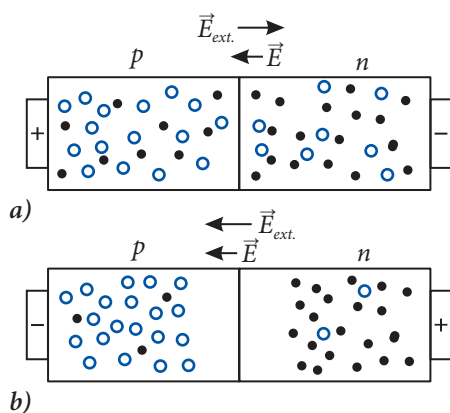


Fig. 5.44

La conectarea joncțiunii în **sens invers** – partea p la polul negativ și partea n – la cel pozitiv – purtătorii majoritari sînt atrași de la suprafața de contact (fig. 5.44, b). Stratul de baraj, sărăcit de purtătorii liberi de sarcină, devine mai lat, rezistența lui crește considerabil. Curentul electric în acest sens aproape că lipsește. Ramura respectivă a dependenței curent–tensiune, din figura 5.45, corespunde tensiunilor negative.

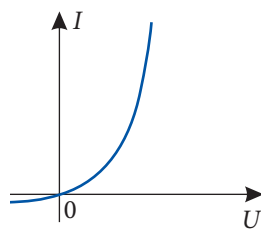


Fig. 5.45

Astfel, prin joncțiunea p – n curentul electric poate circula numai într-un sens. Ea posedă proprietăți **redresoare** și mai este numită **diodă semiconductoare**.

Simbolul grafic al diodei semiconductoare în scheme este reprezentat în figura 5.46. Sensul săgeții corespunde sensului fizic al curentului prin diodă.



Fig. 5.46

Pentru a realiza dioda semiconductoare, se ia o placă de siliciu sau germaniu care conține atomi de impuritate penta-valentă, adică este un semiconductor de tip n . Pe o față a ei se depune, prin sudură, indiu sau alt element trivalent. Atomii de indiu pătrund prin difuziune într-o regiune a plăcii, transformînd-o în semiconductor de tip p , restul plăcii fiind de tip n (fig. 5.47). Astfel se obține joncțiunea p – n . Pentru a proteja joncțiunea (dioda) de acțiunile dăunătoare din exterior, ea este închisă într-un corp metalic sau din plastic.

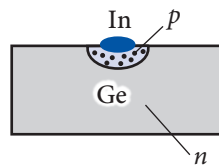


Fig. 5.47

În figura 5.48 este reprezentată schema unui montaj cu 4 diode semiconductoare, folosit pentru redresarea curentului alternativ, al cărui sens variază în timp. Analizînd schema, constatați că sensul curentului prin rezistorul R este același pentru ambele polarități ale tensiunii exterioare dintre bornele montajului.

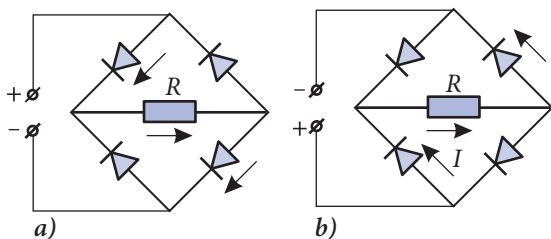


Fig. 5.48

e. Tranzistorul

La sfârșitul anilor '40 ai secolului XX, cercetările în domeniul fizicii semiconductoarelor s-au încununat cu o realizare deosebit de importantă – savanții americani John Bardeen (1908–1991), Walter Brattain (1902–1987) și William Shockley (1910–1989) au inventat **tranzistorul (trioda semiconductoare)**. Este vorba de un cristal semiconductor în care există trei regiuni avînd conducție extrinsecă: două de tip n și una de tip p între ele sau două de tip p și una de tip n (fig. 5.49). De ambele părți ale unei plăci din germaniu sau siliciu care conține atomi pentavalenți în concentrație mică (semiconductor de tip n) este depus, prin sudură, indiu sau un alt element trivalent. Prin difuziune atomii trivalenți pătrund în regiunile învecinate ale germaniului astfel încît acesta devine semiconductor de tip p . În felul acesta se obțin trei regiuni de cristal avînd conducții extrinsece diferite – tranzistorul $p-n-p$ (fig. 5.49, a). În mod similar se obține tranzistorul $n-p-n$: de ambele părți ale unei plăci din germaniu sau siliciu de tip p este depus prin sudură un element pentavalent, de exemplu arseniu (fig. 5.49, b).

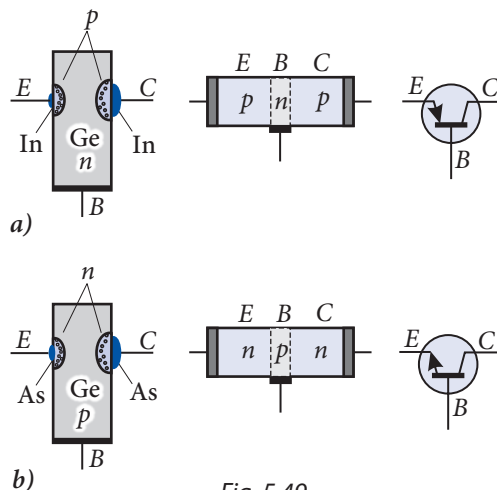


Fig. 5.49

Din colonița de mijloc a figurii 5.49, se observă că tranzistorul este un sistem de două joncțiuni semiconductoare ale căror sensuri directe sînt opuse. Distanța dintre joncțiuni este mică (circa $10\ \mu\text{m}$), din care cauză ele influențează una asupra alteia. Regiunea situată la mijloc se numește **bază (B)**, iar cele laterale se numesc: **emitor (E)** și **colector (C)**. Tranzistorul are trei electrozi – cîte unul de la fiecare regiune.

Pentru a recunoaște în scheme tipul tranzistorului, segmentul care unește emitorul și baza din simbolul lui are o săgeată ce indică sensul direct al curentului între emitor și bază: de la regiunea p la regiunea n (vezi colonița din dreapta a fig. 5.49).

Să analizăm funcționarea, de exemplu, a tranzistorului de tip $n-p-n$, conectat în rețea conform schemei reprezentate în figura 5.50. Ea conține două circuite: emitor-bază (circuitul I) și bază-colector (circuitul II). Baza este element comun al ambelor circuite, din care cauză această modalitate de conectare a tranzistorului în rețea este numită **conectare cu bază comună**.

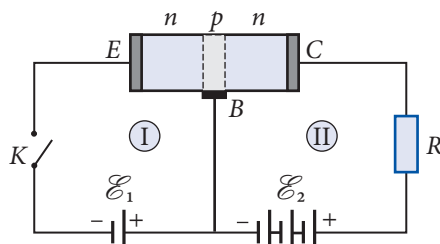


Fig. 5.50

Admitem că circuitul emitorului este deschis. Joncțiunea $p-n$ din circuitul colectorului este legată în sens invers la sursa \mathcal{E}_2 . Curentul electric în acest circuit este deci condiționat de purtătorii minoritari, a căror concentrație este foarte mică. Prin urmare, intensitatea acestui curent este, de asemenea, foarte mică. La închiderea

întrerupătorului K joncțiunea $n-p$ din circuitul emitorului este conectată în sens direct la sursa de curent \mathcal{E}_1 . Curentul electric prin această joncțiune este condiționat de purtătorii majoritari, deci intensitatea curentului în circuitul emitorului este mare. Electronii de conducție trec din emitor în bază. S-a menționat că grosimea acesteia este mică, de aceea majoritatea lor trec în regiunea colectorului, astfel că în circuitul colectorului apare curent electric de intensitate aproape egală cu a curentului din circuitul emitorului. Tensiunea electromotoare \mathcal{E}_2 și rezistența R având valori mari, implicit și tensiunea la bornele rezistorului R este mare.

Astfel, o tensiune mică aplicată la circuitul emitor generează o tensiune mare între bornele rezistorului R din circuitul colector. Dacă tensiunea din circuitul emitor este variabilă în timp, va varia sincron și tensiunea din circuitul colector, ultima însă luând valori mult mai mari decât prima. În acest mod este realizată amplificarea semnalelor electrice cu ajutorul tranzistorului.

Proprietatea remarcabilă a tranzistoarelor de a amplifica semnalele, de a închide și a întrerupe circuitele electrice și-a găsit aplicație largă în industrie, în cercetările științifice și în uz casnic. Utilizarea lor a permis dirijarea automată a celor mai diferite procese tehnologice în industrie, miniaturizarea aparatului radioelectronic.

Inventarea dispozitivelor semiconductoare – diode semiconductoare și tranzistoare – a condiționat proiectarea și construirea generațiilor noi de calculatoare electronice, mult mai performante decât predecesoarele lor.

Tehnologiile moderne au permis confecționarea circuitelor integrate – a unor cristale semiconductoare care conțin un număr mare de elemente, ca diode semiconductoare și tranzistoare, condensatoare și rezistoare ș.a. Utilizarea acestora în calculatoarele electronice a condiționat micșorarea dimensiunilor aparatelor pînă la cele ale unui ghiozdan școlar și mai mici, ceea ce a făcut posibilă folosirea calculatoarelor în cele mai diverse domenii de activitate umană – de la cosmos pînă la masa de lucru a elevului.

Cercetările materialelor semiconductoare se află în centrul atenției fizicienilor de la Academia de Științe și de la Universitățile din Moldova. Grupul de savanți condus de acad. Sergiu Rădăuțanu (1926–1998) a obținut și a studiat proprietățile unor substanțe semiconductoare noi. Sub conducerea și cu participarea acad. Alexei Simașchevici (n. 1929) au fost elaborate dispozitive optoelectronice și celule solare semiconductoare. În laboratorul acad. Dumitru Ghițu (1931–2008) au fost studiate proprietățile structurilor semimetalice cu dimensiuni limitate, a fost elaborată o serie de traductoare, senzori și alte dispozitive folosite în industrie. Cercetătorii din echipa condusă de acad. Andrei Andrieș (1933–2012) au obținut și studiat fibre semiconductoare cu proprietăți performante pentru comunicațiile optice. Sub îndrumarea acad. Valeriu Canțer (n. 1955) a fost elaborată tehnologia obținerii unor materiale și structuri pentru detectarea, transmiterea și procesarea informației în domeniul infraroșu, au fost efectuate cercetări legate de domeniul redimensionării proprietăților corpului solid prin structurare la scară nanometrică.

Cercetări importante în domeniul teoriei corpului solid, în particular al substanțelor semiconductoare, au realizat colectivele de fizicieni conduse de academicienii Sveatoslav Moscalenco (n. 1928) și Victor Kovarschi (1929–2000).

1. Care substanțe sînt numite semiconductoare?
2. Care sînt purtătorii liberi de sarcină în semiconductoare?
3. Cum depinde rezistivitatea semiconductoarelor de temperatură? Cum se explică această dependență?
4. Ce prezintă fotorezistorul? Cum funcționează el? Unde se folosește?
5. Care este valența atomilor de impuritate în siliciu de tip n ? Care sînt purtătorii majoritari și minoritari în semiconductoarele de acest tip?
6. Ce impurități sînt numite acceptoare? Care este valența atomilor respectivi? Care sînt purtătorii majoritari și cei minoritari în semiconductoarele cu impurități acceptoare?
7. Cum este concentrația electronilor de conducție și cea a golurilor în semiconductorul intrinsec? Dar în cel de tip n ? Dar în cel de tip p ?
8. Cum se explică influența substanțială a atomilor de impuritate asupra rezistivității semiconductoarelor?
9. Ce prezintă joncțiunea $p-n$? Cum se explică circulația prin ea a curentului electric numai într-un sens?
10. Ce schimbări trebuie efectuate în schema din figura 5.50 la înlocuirea în ea a tranzistorului de tip $n-p-n$ cu un tranzistor de tip $p-n-p$?
11. În figura 5.51 este reprezentată modalitatea de conectare a tranzistorului $n-p-n$ în rețea, numită *schemă cu emitor comun*. Analizați și descrieți în baza acestei scheme amplificarea semnalelor electrice.
12. Cum se explică faptul că tranzistoarele și diodele semiconductoare nu pot funcționa la temperaturi înalte?

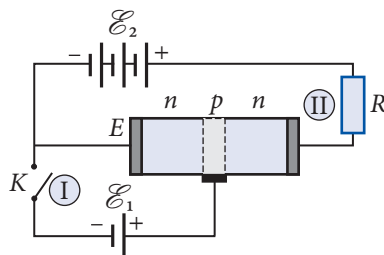


Fig. 5.51

5.7

CURENTUL ELECTRIC ÎN ELECTROLIȚI

a. Disocierea electrolitică. Purtătorii de sarcină electrică în electroliți. Electroliza

Este bine cunoscut faptul că sarea de bucătărie (NaCl), precum și apa distilată sînt izolatoare, nu conduc curentul electric, dar soluția apoasă a sării de bucătărie este un mediu conductor.

Substanțele – săruri, acizi, baze, ale căror soluții în apă sau în alte lichide conduc curent electric se numesc electroliți.

Din categoria electroliților fac parte de asemenea substanțele trecute în stare lichidă prin topire, dacă în această stare ele conduc curent electric.

Mecanismul formării purtătorilor liberi de sarcină electrică în electroliți ne este bine cunoscut de la orele de chimie. În molecula de NaCl atomul de natriu cedează un electron atomului de clor, transformîndu-se în ioni Na^+ și Cl^- . Interacțiunea acestor ioni cu moleculele de apă slăbește legătura ionică dintre ei și în urma mișcării termice molecula neutră se descompune în ioni. O parte din moleculele de NaCl se

descompun în procesul dizolvării – cristalul este părăsit nu numai de molecule neutre, ci și de porțiuni ale acestora – de ioni.

Procesul de descompunere a substanței în ioni de semne opuse se numește **disocier** (disociație) **electrolitică**.

În lipsa câmpului electric exterior ionii se mișcă haotic în soluție. În timpul mișcărilor unii ioni de semne opuse pot să se apropie unul de altul la distanțe destul de mici și să se unească în molecule neutre. Acest proces este numit **recombina**re.

Astfel, în electroliți se produc concomitent două procese – disocierea și recombina-re. În primul din ele moleculele neutre se descompun în ioni de semne opuse, în cel de-al doilea, invers, ionii de semne opuse se unesc în molecule neutre. În consecință, se stabilește un **echilibru dinamic** între aceste procese, concentrația ionilor fiind constantă (în condiții neschimbate). La ridicarea temperaturii electrolitului mișcarea termică devine mai intensă, echilibrul dinamic are loc la o concentrație mai mare a ionilor.

Prin urmare, purtătorii liberi de sarcină electrică în electroliți sînt ionii de semne opuse. **Electroliții sînt substanțe cu conducție electrică ionică**.

Afît în metale, cît și în semiconductoare, circulația curentului electric nu este însoțită de transportul substanței. O situație complet diferită are loc în cazul electroliților. În mișcarea ordonată a lor ionii transportă nu numai sarcina electrică, dar și o anumită masă de substanță.

Să introducem termenii necesari pentru descrierea curentului electric în electroliți. Vasul cu electrolit în care se introduc doi electrozi, de obicei din carbon (fig. 5.52), poartă de regulă denumirea de **baie electrolitică** sau **electrolizor**. Electrocul conectat la polul pozitiv al sursei de curent este numit **anod**, cel conectat la polul negativ – **catod**. Dacă între electrozi este aplicată tensiunea electrică, ionii pozitivi se deplasează spre catod, din care cauză sînt numiți **cationi**, iar cei negativi se deplasează spre anod și sînt numiți **anioni**.

Ajunghînd la catod, ionii pozitivi primesc electroni din circuitul exterior și devin neutri. Ionii negativi ajunghînd la anod cedează electroni circuitului exterior. Substanțele neutre obținute în acest fel se depun pe electrozi, rămîn în soluții sau se degajă sub forma bulelor de gaz.

Totalitatea proceselor electrochimice care au loc la electrozii introduși în electroliți la trecerea curentului prin ei poartă denumirea de **electroliză**.

b.* Legile lui Faraday

Pentru prima dată electroliza a fost observată de savanții englezi Anthony Carlisle și William Nicholson. În 1800, ei au publicat un articol în care descriu apariția bulelor cu gaz lîngă electrozii introduși în apă și conectați la o baterie electrică Volta.

Electroliza a fost cercetată experimental de Michael Faraday, care a stabilit legile respective (1833), însă aici legile vor fi deduse în baza concepțiilor moderne despre structura substanței.

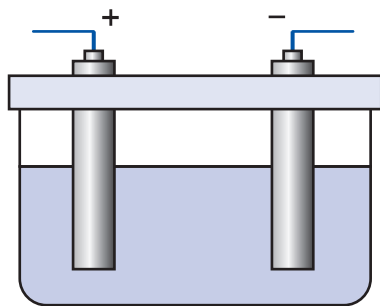


Fig. 5.52

Admitem că în timpul electrolizei la catod au ajuns N ioni pozitivi. Notăm cu m_{oi} masa unui ion și cu q_{oi} sarcina electrică a lui. Masa de substanță depusă pe catod este $m = Nm_{oi}$, iar sarcina electrică transportată prin electrolit $q = Nq_{oi}$. Făcând raportul acestor mărimi, obținem:

$$\frac{m}{q} = \frac{m_{oi}}{q_{oi}} = k. \quad (5.46)$$

Raportul k dintre masa și sarcina electrică a ionului este o mărime constantă pentru substanța dată și este numit **echivalent electrochimic**. Unitatea lui

$$[k] = \text{kg/C}.$$

Din relația (5.46) avem:

$$m = kq. \quad (5.47)$$

Masa de substanță depusă la electrod este direct proporțională cu sarcina electrică transportată prin electrolit (**prima lege a lui Faraday pentru electroliză**).

Din relația (5.47) rezultă că **echivalentul electrochimic este numeric egal cu masa substanței depuse la electrod în timpul când prin electrolit este transportată o sarcină electrică de 1 C**.

În cazul intensității constante I a curentului, sarcina transportată prin electrolit $q = It$. Relația (5.47) ia forma frecvent folosită

$$m = kIt. \quad (5.48)$$

Să analizăm expresia (5.46) pentru echivalentul electrochimic. Masa unui ion $m_{oi} = \frac{M}{N_A}$, unde M este masa molară a substanței și N_A numărul lui Avogadro. Sarcina electrică a ionului $q_{oi} = ne$, unde n este valența și e sarcina electrică elementară. Substituind aceste valori în relația (5.46), pentru echivalentul electrochimic avem:

$$k = \frac{M}{N_A en}. \quad (5.49)$$

Mărimea

$$F = N_A e \quad (5.50)$$

este produsul a două constante universale și reprezintă deci o constantă universală. Ea poartă numele de **constanta** sau **numărul lui Faraday**. Valoarea ei $F = 96\,500 \text{ C/mol}$.

Expresia (5.49) ia forma:

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n}. \quad (5.51)$$

Raportul $\frac{M}{n}$ este numit **echivalent chimic**.

Echivalentul electrochimic al unei substanțe este direct proporțional cu echivalentul chimic al ei (**legea a doua a lui Faraday pentru electroliză**).

Substituind (5.51) în (5.48), obținem **legea generală a electrolizei**:

$$m = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n} It. \quad (5.52)$$

Menționăm că legile electrolizei au fost stabilite pe cale experimentală, pe această cale fiind determinate valorile echivalenților chimici și cea a numărului lui Faraday.

Cercetările din domeniul electrolizei au avut o importanță deosebită în fizică, deoarece au dus la ipoteza despre existența în natură a unei sarcini electrice elementare. În lucrările sale referitor la electroliză, Faraday menționa că raportul constant dintre masa de substanță depusă la electrod și cantitatea de substanță transportată prin electrolit sugerează ideea că „atomii corpurilor, echivalenți între ei în ceea ce privește acțiunile chimice, conțin cantități egale de electricitate, legate natural cu ei”.

În 1881, fizicianul german Hermann von Helmholtz (1821–1894) scria că la electroliză „...permanent una și aceeași cantitate de electricitate se deplasează împreună cu un ion monovalent... însoțindu-l inseparabil. Această cantitate poate fi numită sarcină a ionului. Dacă noi admitem existența atomilor chimici, atunci sîntem siliți să conchidem că și electricitatea, atît cea pozitivă, cît și cea negativă, se divizează în cantități anumite, care joacă rolul *atomilor de electricitate*”.

Din relațiile (5.50) și (5.52) exprimăm sarcina electrică elementară:

$$e = \frac{MIt}{mN_A n}. \quad (5.53)$$

Pentru a determina valoarea sarcinii elementare e , trebuie să fie cunoscută masa de substanță m depusă la electrod în timpul t la intensitatea curentului prin electrolit egală cu I , masa molară M a substanței, valența n , precum și numărul lui Avogadro N_A . Pe această cale George Johnstone Stoney (1826–1911) a fost primul care a obținut pentru e o valoare apropiată de cea adoptată în prezent: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Pentru această cantitate de electricitate, în 1890, Stoney a propus termenul „electron”. Ulterior denumirea a fost adoptată pentru particula descoperită de fizicianul englez J.J. Thomson (1856–1940) în 1897, a cărei sarcină electrică $q_e = -e$.

c. Aplicații ale electrolizei

Fenomenul electrolizei are o vastă aplicație în practică, în principal la obținerea, purificarea și prelucrarea metalelor. S-au dezvoltat ramuri anumite ale industriei.

Electrometalurgia are la bază procesul de obținere prin electroliză a unor metale din minereurile respective. De exemplu, a aluminiului din bauxită, minereu ce conține oxizi ai aluminiului și compuși cu sulf. Baia electrolitică are pereții și fundul din fontă, fundul fiind înclinat și avînd un orificiu pentru scurgerea aluminiului lichid. În baie este încărcat minereul și sînt introduși electrozi din grafit. Ei prezintă anodul, iar fundul băii – catodul. Curentul electric de intensitate mare, care circulă prin minereu, îl încălzește pînă ce acesta se topește și se produce disocierea electrolitică a moleculelor. Aluminiul se depune la fundul băii și periodic este lăsat liber să curgă în forme speciale. Această metodă permite obținerea unei producții ieftine de aluminiu. Prin electroliză se obține, de asemenea, natriul, magniul, beriliul etc.

Prin **rafinarea electrolitică** se realizează *purificarea* unor metale. De exemplu, cuprul obținut prin convertizarea minereului conține impurități, dar cel utilizat în electrotehnică trebuie să fie cît mai pur. În acest scop anodul din baia electrolitică ce conține soluție de sulfat de cupru (CuSO_4) se confecționează din cupru obținut prin topire, iar catodul – din cupru pur. La electroliză ionii Cu^{2+} se depun pe catod, iar anionii SO_4^{2-} interacționează cu atomii de cupru din materialul anodului și formează molecule CuSO_4 care trec în soluție, unde disociază. În consecință, concentrația ionilor

în electrolit rămîne constantă, iar atomii de cupru trec de la anod la catod, unde se depun, obținându-se cupru purificat. Impuritățile cad pe fundul băii electrolitice. În mod similar sînt purificate și alte metale.

Galvanostegia este procesul de acoperire a corpurilor (de exemplu, din fier) cu straturi subțiri de metale care nu se supun coroziei și care le înfrumusețează. Astfel de substanțe sînt aurul, argintul, nichelul, cromul, cuprul ș.a. Corpul care trebuie acoperit joacă rolul de catod, iar anodul este confecționat din metalul destinat acoperirii, electrolitul reprezintă soluția unor săruri sau oxizi ai acestuia. Prin electroliză corpul se acoperă cu un strat de acest metal. După metalul folosit pentru acoperire, procesul poartă denumirea de aurare, argintare, nichelare, cromare, cuprare etc.

Galvanoplastia constă în realizarea prin metode electrolitice a unor tipare de reproducere a obiectelor, de exemplu, a statuetei. Se confecționează modelul identic din ceară. Acesta se acoperă cu un strat subțire de cărbune (pentru a conduce curentul electric) și se introduce în baia electrolitică în calitate de catod. În urma electrolizei, modelele se acoperă cu un strat de metal. Prin topire ceara este evacuată. Tiparul fiind gata, se umple cu metalul din care se confecționează statueta, apoi tiparul este înlăturat (tăiat în cîteva bucăți, care pot fi folosite la producerea statuetei în serie).

Prin electroliză se obțin, de asemenea, substanțe chimice importante, ca soda caustică ș.a.

Problemă rezolvată*

Se dă:

$$V = 150 \text{ cm}^3,$$

$$p = 120 \text{ kPa},$$

$$I = a - bt,$$

$$a = 10 \text{ A},$$

$$b = \frac{1}{30} \frac{\text{A}}{\text{s}},$$

$$k = 8,3 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{C}},$$

$$M = 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

SI:

$$1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$1,2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

$$T - ?$$

$$\text{K}$$

Oxygenul eliminat la electroliza apei este acumulat într-un recipient izolat termic cu volumul de 150 cm^3 și are presiunea de 120 kPa . Pentru electroliză este utilizat un curent care descrește liniar pînă la dispariție în conformitate cu legea $I = a - bt$, unde $a = 10 \text{ A}$ și $b = \frac{1}{30} (\text{A/s})$. Determinați temperatura oxygenului acumulat. Echivalentul electrochimic și masa molară ale oxygenului $k = 8,3 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{C}}$ și $M = 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$.

Rezolvare

Starea oxygenului acumulat se descrie cu ecuația Clapeyron–Mendeleev (1.30), din care exprimăm temperatura:

$$T = \frac{pVM}{mR},$$

unde $R = 8,31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ este constanta universală a gazelor.

Conform primei legi a lui Faraday pentru electroliză, masa de oxygen eliminată este proporțională cu sarcina electrică:

$$m = kq,$$

unde k este echivalentul electrochimic al oxygenului.

Sarcina electrică q poate fi determinată cu aria figurii de sub graficul intensității în funcție de timp (fig. 5.53). Deoarece electroliza are loc pînă la dispariția curentului $I = 0$, punctul de intersecție cu axa timpului se obține din ecuația $a - bt = 0$, adică $t = a/b$. Așadar, sarcina q este numeric egală cu aria triunghiului din figura 5.53:

$$q = \frac{a^2}{2b}.$$

Pentru temperatura oxigenului avem:

$$T = \frac{pVM}{kqR} = \frac{2bMpV}{ka^2R}; T \approx 557 \text{ K}.$$

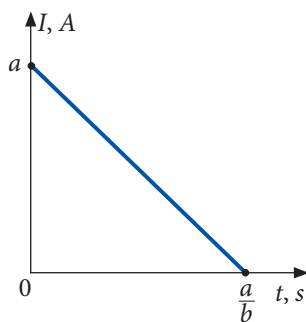


Fig. 5.53

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Care substanțe sînt numite electroliți?
2. Ce prezintă disocierea electrolică? În ce constă fenomenul invers? Cum se numește el?
3. Cum depinde concentrația ionilor din electrolit de temperatură?
4. Cum explicați faptul că în condiții neschimbate concentrația ionilor rămîne constantă? În ce constă echilibrul dinamic?
5. Cum se explică faptul că circulația curentului electric prin electroliți este însoțită de transportarea substanței, iar prin metale – nu?
6. Ce au comun și prin ce diferă conducția intrinsecă a semiconductoarelor și conducția electroliților?
7. În ce constă fenomenul electrolizei?
- 8.*Sînt oare egale masele substanțelor depuse la electrozi, dacă prin electroliți cu concentrații diferite ale ionilor acestor substanțe sînt transportate cantități de electricitate egale?
- 9.*Care este semnificația fizică a echivalentului electrochimic al substanței?
10. Cum se produce purificarea cuprului prin electroliză?
11. Ce prezintă galvanostegia? Ce obiecte casnice prelucrate prin galvanostegie cunoașteți?
- 12.*Ce cantitate de electricitate a trecut prin electrolit în timpul în care la catod s-au depus 1,7 g de zinc? Echivalentul electrochimic al Zn este egal cu $3,4 \cdot 10^{-7} \text{ kg/C}$.
- 13.*Un elev a realizat un experiment pentru a determina echivalentul electrochimic al cuprului. Electroliza sulfatului de cupru (CuSO_4) a durat 30 min. la o intensitate a curentului prin electrolit de 2,5 A. Masa catodului pînă la experiment era egală cu 23,2 g, după – cu 24,7 g. Ce valoare a obținut elevul pentru echivalentul electrochimic al cuprului?
- 14.*O statueta de bronz cu aria totală a suprafeței de 60 cm^2 a fost introdusă, în calitate de catod, într-o baie electrolitică ce conținea o soluție de azotat de argint (AgNO_3). Să se determine intervalul de timp în care statueta va fi acoperită cu un strat de argint cu grosimea medie de $75 \mu\text{m}$, dacă intensitatea curentului prin baie este de 2 A. Masa molară a argintului este egală cu $0,108 \text{ kg/mol}$, densitatea – cu $10,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, argintul fiind monovalent.

a. Descărcarea electrică neautonomă

Este bine cunoscut din practică faptul că gazele, în condiții obișnuite, nu conduc curentul electric, adică sînt izolatoare. De exemplu, conductoarele liniei aeriene de transmisie a energiei electrice nu se acoperă cu un strat izolator, deoarece între ele se află aer. Acesta servește în calitate de dielectric și la condensatoarele cu aer.

În anumite condiții însă, care vor fi stabilite ulterior, gazele conduc curent electric.

Trecerea curentului electric prin gaze este numită descărcare electrică în gaze.

Știm că una dintre condițiile de existență a curentului electric într-un mediu oarecare este prezența în el a purtătorilor liberi de sarcină electrică. Gazele sînt constituite din molecule sau atomi neutri. Ele conțin o cantitate infimă de electroni liberi. De exemplu, concentrația electronilor liberi în aer în condiții normale este de circa 10^{14} ori mai mică decît în metale și poate asigura un curent electric de o intensitate extrem de mică.

Să analizăm următorul experiment (fig. 5.54): două discuri metalice sînt legate cu conductoare la un electrometru, unul la bilă și altul la corpul lui. Discurile se încarcă cu sarcini de semne opuse (fig. 5.54, a). Se observă că timp îndelungat deviația acului indicator al electrometrului nu se modifică, ceea ce se explică prin lipsa curentului electric între discuri.

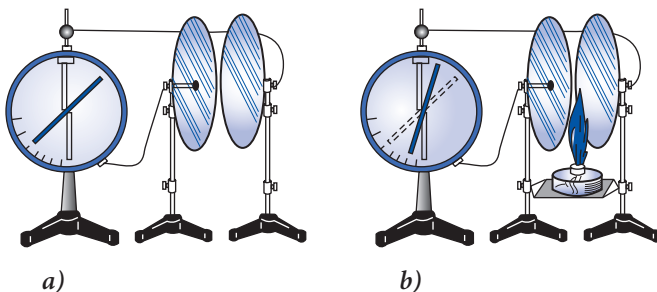


Fig. 5.54

Luăm o spirtieră și o aprindem. La introducerea flăcării în spațiul dintre plăci se observă micșorarea deviației acului electrometrului (fig. 5.54, b), ceea ce se poate explica numai prin circulația între discuri a curentului electric. Rezultă că flacăra a produs în aer purtători liberi de sarcină electrică. Acest experiment poate fi realizat înlocuind flacăra cu un fir metalic încălzit puternic. La temperaturi înalte moleculele au viteze termice mari, unele ciocniri dintre ele fiind însoțite de pierderea unui electron și transformarea moleculei în ion pozitiv. Acest proces este numit **ionizare**, iar factorul care o produce – **ionizator**. Bineînțeles, pentru a separa electronul din molecula neutră, se consumă o cantitate de energie.

Se numește **energie de ionizare** (W_0) energia minimă suficientă pentru a îndepărta un electron dintr-o moleculă neutră.

Menționăm că unii electroni pot fi captați de molecule neutre, acestea transformându-se în ioni negativi. Astfel, **purtătorii liberi de sarcină electrică în gaze sînt: electronii, ionii pozitivi și cei negativi.**

Concomitent, în gazele ionizate are loc procesul invers ionizării – procesul de **recombinare**, în care ionul pozitiv captează un electron și se transformă în moleculă

neutră. Dacă condițiile în care se află gazul ionizat nu se modifică în timp, atunci se stabilește echilibrul dinamic între procesele de ionizare și de recombinare, iar concentrațiile purtătorilor de sarcină nu variază în timp.

Ionizarea, după cum s-a văzut, este însoțită de consumul unei cantități de energie. La recombinare, invers, este degajată o energie, de obicei sub formă de radiație luminoasă.

Să enumerăm și alți factori ionizatori: lumina, radiațiile ultraviolete și Röntgen, fluxurile de particule încărcate, cum sînt razele cosmice (radiație ce provine din spațiul cosmic), particulele radioactive ș.a. Anume datorită razelor cosmice și radioactivității terestre, aerul atmosferic conține electroni liberi, ceea ce s-a menționat mai sus.

Să analizăm dependența intensității curentului electric în gaze de tensiunea aplicată. Schema instalației este reprezentată în figura 5.55. Tubul închis T cu doi electrozi – catodul C și anodul A – conține gazul cercetat. Tensiunea dintre electrozi poate fi modificată cu ajutorul potențiometrului P . În timpul experimentului acțiunea ionizatorului (în figură nu este indicat) nu se modifică, ceea ce asigură formarea unui număr constant de purtători de sarcină într-o unitate de timp.

La închiderea întrerupătorului K , electronii și ionii negativi se deplasează spre anod, iar ionii pozitivi – spre catod. Ajunși la electrozi ionii fac schimbul respectiv de electroni și se transformă în molecule neutre care rămîn în componența gazului din tub.

Admitem că tensiunea dintre electrozi se mărește lent, începînd cu valoarea zero. Respectiv, se măresc vitezele mișcării ordonate a purtătorilor de sarcină, crește intensitatea curentului. La tensiuni joase, intensitatea curentului este direct proporțională cu tensiunea ($I \sim U$), adică se respectă legea lui Ohm (porțiunea OA , fig. 5.56). La mărirea ulterioară a tensiunii U se observă o creștere mai lentă a intensității I (porțiunea AB), urmată de stabilirea unei valori constante I_s a intensității numită **de saturație** (porțiunea BC). În această situație în fiecare secundă la electrozi ajunge un număr de purtători egal cu cel care se obține într-o secundă prin ionizare.

Dacă însă acțiunea ionizatorului încetează, purtătorii existenți în tub ajung la electrozi, purtători noi nu apar și descărcarea încetează. Descărcarea electrică ce are loc numai în prezența ionizatorului se numește **descărcare electrică neautonomă**.

Mărind în continuare tensiunea dintre electrozi, vom observa, la un moment, creșterea bruscă a intensității (porțiunea CD , fig. 5.56). Aceasta denotă faptul că în procesul de conducție electrică s-au inclus purtători noi. Să explicăm mecanismul apariției lor. În cîmpul electric de intensitate \vec{E} , asupra purtătorilor de sarcină electrică elementară $\pm e$ acționează o forță al cărei modul $F_e = eE$. Notăm cu λ distanța

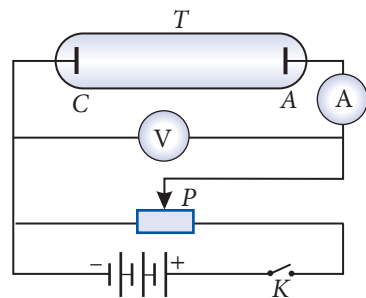


Fig. 5.55

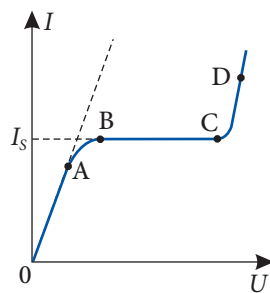


Fig. 5.56

medie parcursă de purtătorul de sarcină între două ciocniri succesive cu alte particule. Acționînd pe această distanță, forța electrică efectuează lucrul:

$$L = F_e \lambda = eE\lambda. \quad (5.54)$$

Aceasta reprezintă valoarea maximă a lucrului în cazul în care purtătorul de sarcină se deplasează în sensul acțiunii forței F_e și este folosită în scopul estimării mărimilor ce caracterizează descărcarea electrică.

Distanța λ_e dintre două ciocniri succesive ale electronilor este mult mai mare decît distanța respectivă λ_i pentru ioni care au dimensiuni mai mari și sînt mai frecvent supuși ciocnirilor. De aceea creșterea energiei cinetice a electronului între două ciocniri succesive, egală cu lucrul (5.54), este mai mare decît a ionilor. Astfel, la o tensiune U dintre electrozi intensitatea cîmpului E capătă o valoare la care creșterea energiei cinetice a electronului este suficientă pentru a ioniza molecula, adică este egală cu energia de ionizare:

$$W_0 = eE\lambda_e. \quad (5.55)$$

În aceste condiții electronii deveniți liberi în urma acțiunii ionizatorului extern ionizează prin ciocnire moleculele gazului. Acest proces se numește **ionizare prin ciocnire (prin șoc) de electroni**.

Menționăm o proprietate specifică a ionizării în cauză. În urma ciocnirii unui electron cu molecula neutră și ionizarea acesteia, se obțin doi electroni liberi. Astfel, după fiecare ciocnire următoare, numărul acestora se dublează: 4, 8, 16... . Se formează o **avalanșă de electroni** care crește pînă la atingerea anodului (fig. 5.57).

La încetarea acțiunii ionizatorului, avalanșele de electroni ajung la anod, ionii pozitivi – la catod. În lipsa electronilor și a ionilor noi, descărcarea încetează. În aceste condiții descărcarea este neautonomă.

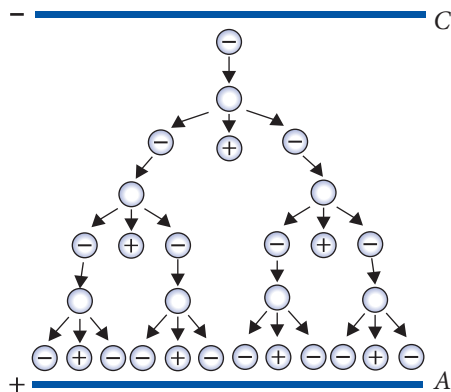


Fig. 5.57

b. Descărcarea autonomă în gaze. Aplicații

La mărirea în continuare a tensiunii U dintre electrozi, se atinge o valoare a intensității E la care lucrul efectuat de cîmp asigură o creștere a energiei cinetice a ionilor (între două ciocniri succesive) suficientă ca ei să producă ionizarea prin ciocnire, adică este satisfăcută condiția:

$$W_0 = eE\lambda_i. \quad (5.56)$$

Ionii pozitivi ciocnesc puternic catodul și din el sînt eliberați electroni. Fiind accelerați, ei produc ionizare prin ciocniri, numărul lor crește în avalanșă. Descărcarea electrică continuă și, după încetarea acțiunii ionizatorului extern, ea devine autonomă. Astfel, condiția (5.56) este condiția de trecere a descărcării neautonome în **descărcare autonomă**.

Există mai multe feluri de descărcare autonomă, în funcție de modul în care este satisfăcută condiția (5.56) ce conține doi factori: E și λ_i .

La presiuni mici, distanțele dintre molecule sînt mai mari decît la presiunea atmosferică normală, respectiv și distanța λ_i parcursă de ioni între două ciocniri succesive este mai mare. Trecerea descărcării electrice din neautonomă în autonomă se produce la intensități E mai mici ale cîmpului electric. Descărcarea autonomă la presiuni mici este numită **descărcare luminescentă**. Concentrația electronilor liberi și a ionilor fiind mare, recombinația lor este intensă. În consecință, se emite radiație luminoasă, ceea ce și justifică denumirea acestui fel de descărcare. Culoarea luminii emise depinde de natura gazului din tub.

Descărcarea luminescentă se aplică pe larg la panourile de reclamă. Se confecționează tuburi din sticlă de forma unor litere sau a unor figuri. La capetele lor se montează electrozi. Tuburile se umplu, de obicei, cu gaze inerte. La descărcarea luminescentă tuburile emit lumină: cele cu neon – de culoare roșie, cele cu argon – de culoare albăstrie-verzuie.

Acest fel de descărcare are loc și în **tuburile luminescente** folosite la iluminare. Descărcarea se produce în vapori de mercur și este însoțită de radiație ultravioletă. Aceasta cade pe o substanță specială care acoperă suprafața interioară a tubului. Sub acțiunea radiației ultraviolete substanța emite lumină mult mai apropiată de lumina solară decît lumina emisă de becurile cu incandescență, din care cauză tuburile luminescente mai sînt numite și lămpi *lumină de zi*. În plus, aceste lămpi sînt mai economicoase decît becurile cu incandescență și se numesc și **tuburi** sau **lămpi ecologice** (fig. 5.58).



Fig. 5.58

Descărcarea luminescentă are loc și în laserele cu gaz.

Dintre descărcările autonome la presiune atmosferică, cea mai cunoscută este **descărcarea în scînteie**. Stabilind între bilele mașinii electrostatice o distanță de circa 2–3 cm și rotind mînerul ei, la un moment între bile ia naștere o scînteie electrică însoțită de o pocnitură. Scînteia are forma unui canal luminos ce unește ambii electrozi (bilele). Canalul are forma unei linii frînte de formă complicată cu multe ramificații (fig. 5.59).

Fulgerul și trăsnetul sînt exemple ale descărcării în scînteie ce se produc în atmosferă. Parametrii acestora sînt impunători: canalul principal are diametrul de circa 10–25 cm și lungimea de pînă la



Fig. 5.59

zeci de kilometri, intensitatea curentului ia valori de pînă la sute de mii de amperi la tensiuni de circa 20–100 milioane de volți. Temperatura în canal atinge valori de ordinul a zeci de mii de kelvini, ceea ce produce o variație bruscă a presiunii, excitîndu-se o undă de șoc, drept care auzim tunetul.

La descărcarea în scînteie la o distanță mică între electrozi, electronii accelerați, ciocnind anodul, produc o deteriorare a suprafeței acestuia. Fenomenul dat stă la baza

metodei de prelucrare a suprafeței metalelor cu scînteii electrice. Rezultate importante în acest domeniu au fost obținute la Institutul de Fizică Aplicată al Academiei de Științe a Moldovei de școala științifică de prelucrare a metalelor prin electroeroziune fondată de academicianul Boris Lazarenco (1910–1979). Au fost elaborate noi metode tehnologice de depunere a învelișurilor metalice.

În cazul în care cîmpul electric este profund neomogen, de exemplu în vecinătatea vîrfurilor metalice ascuțite sau a conductoarelor subțiri electrizate, se observă **descărcarea în coroană**, numită și **efect corona**. În cazul în care intensitatea cîmpului în această regiune atinge valori de circa $3 \cdot 10^6$ V/m, în ea se produce ionizarea prin ciocniri ale electronilor. La îndepărtarea de la această regiune spre celălalt electrod, intensitatea cîmpului se micșorează, ionizarea prin ciocniri nu se mai produce. Ionizarea, precum și recombinarea, se produc într-o regiune limitată a spațiului, în vecinătatea vîrfului ascuțit. Această regiune este luminoasă datorită recombinației și are forma unei coroane, ceea ce și justifică denumirea de descărcare în coroană.

Descărcarea în coroană se observă în natură. Înainte de furtuni sau în timpul furtunilor, sub acțiunea cîmpului electric din atmosferă asupra vîrfurilor obiectelor înalte, cum ar fi copaci ori catargele navelor aflate în largul mării ș.a., iau naștere coroane luminoase. Acestea sînt cunoscute sub numele de *focurile Sfîntului Elme*.

Un alt fel de descărcare autonomă, cu vaste aplicații practice, este **descărcarea în arc**. Se pun în contact, se ating doi electrozi (din grafit presat sau metal) conectați la sursa de curent. Rezistența în regiunea contactului este mare, se degajă o cantitate mare de căldură. Catodul încălzit pînă la temperatură înaltă emite electroni (vezi par. 5.9, a). Aerul dintre electrozi devine puternic ionizat, rezistența lui se micșorează. Curentul electric circulă, și după îndepărtarea electrozilor unul de altul, la tensiuni mici între ei intensitatea curentului este mare. Electronii bombardînd anodul, formează în el o adîncitură – un *crater* –, regiune în care temperatura este cea mai mare. La presiune atmosferică ea atinge valori de circa 4 000 K, iar la presiuni înalte devine chiar mai mare decît temperatura la suprafața Soarelui (aproximativ 6 000 K). Coloana de gaz dintre electrozi devine o sursă puternică de lumină de forma unui arc (fig. 5.60), de unde și numele descărcării electrice de acest fel.

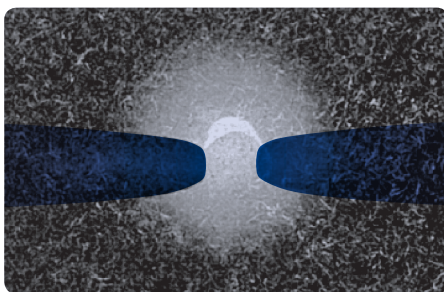


Fig. 5.60

Proprietățile menționate ale descărcării în arc au determinat aplicațiile ei în practică: surse de lumină în proiectoare puternice, la sudarea, perforarea și tăierea metalelor, la topirea minereurilor în cuptoarele electrice ș.a.

c.* Plasma

După cum am observat, descărcarea electrică se produce în gaz ionizat, în care densitățile sarcinilor pozitive și negative sînt egale, astfel încît gazul ionizat este în întregime neutru. Această stare a substanței se numește **plasmă**.

Plasma este considerată **starea a patra a substanței**. Astfel, în ordinea creșterii temperaturii substanța există în stările următoare: **solidă** → **lichidă** → **gazoasă** → **de plasmă**. După proprietățile sale plasma este apropiată de gaze, la ea aplicându-se unele dintre legile gazelor. Există însă și deosebiri esențiale. În gaze moleculele sînt neutre și interacțiunea dintre ele este slabă. Particulele încărcate din componența plasmei – ionii, electronii – interacționează cu forțe electrice care au o rază de acțiune mare (în comparație cu razele particulelor), ceea ce condiționează proprietăți specifice plasmei: în ea se pot excita diferite oscilații și se pot propaga unde, plasma are o comportare caracteristică numai ei în câmpurile electrice și magnetice.

Menționăm că plasma este starea cea mai răspîndită în Univers: în această stare se află circa 99% din substanțe. Stelele, Soarele, nebuloasele galactice se află în stare de plasmă. Pămîntul este, de asemenea, înconjurat de plasmă: stratul superior al atmosferei – **ionosfera** – este format din gaz ionizat.

Plasma și-a găsit importante aplicații practice. Jeturile de plasmă cu temperaturi de ordinul 10^3 – 10^4 K se aplică la prelucrarea metalelor și aliajelor, la perforarea rocilor tari, în unele generatoare de energie electrică.

Se efectuează cercetări vaste ale plasmei la temperaturi foarte înalte, de zeci de milioane de K, în perspectiva realizării reacției termonucleare dirijate, care ar sta la baza funcționării unor surse de energie efectiv inepuizabile.

VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. Care sînt purtătorii liberi de sarcină electrică în gaze?
2. Prin ce se deosebește ionizarea gazelor de disocierea electrochimică?
3. Ce se numește descărcare neautonomă?
4. Se respectă legea lui Ohm la descărcarea în gaze?
5. Cum poate fi modificată valoarea intensității curentului de saturație?
6. Ce prezintă ionizarea prin ciocniri de electroni și în ce condiții are loc?
7. Prin ce diferă descărcarea autonomă de descărcarea neautonomă în gaze?
8. În ce condiții descărcarea neautonomă trece în autonomă?
9. Cum se explică faptul că descărcarea autonomă în gaze este însoțită de emisia luminii?
10. Ce aplicații practice ale descărcării luminescente cunoașteți?
11. În ce condiții are loc descărcarea în coroană? De ce lumina este emisă într-o regiune limitată din vecinătatea electrodului cu vîrf ascuțit?
- 12.*Ce prezintă plasma?
- 13.*Care sînt domeniile de aplicare a plasmei?

a. Emisia termoelectronică. Dioda cu vid. Trioda

Inventatorul american Thomas Alva Edison (1847–1931), renumit prin construirea unui bec cu incandescență, mai evoluat decât cele ale predecesorilor săi și care putea fi folosit pe larg ca sursă de lumină, cerceta, în 1894, cauzele înnegrii suprafeței interioare a acestuia în urma funcționării îndelungate. El a introdus în becul vidat nu numai filamentul, ci și un electrod de forma unei plăci (*fig. 5.61*) și a constatat că, legînd acest electrod la polul pozitiv, iar filamentul incandescent – la polul negativ al sursei de curent, în acest circuit se creează curent electric, chiar dacă electrodul-placă și filamentul nu se află în contact. Astfel, pentru prima dată a fost observat curentul electric în vid. La acel timp nici Edison, nici alți fizicieni nu au putut explica fenomenul, ceea ce s-a reușit abia după descoperirea electronului în 1897.

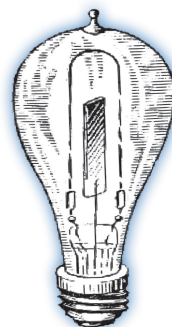
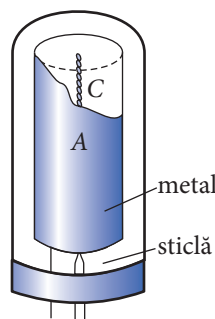


Fig. 5.61

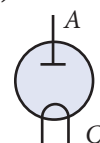
În metale, la temperatura camerei, electronii sînt reținuți în interiorul lor de forțe de atracție ale ionilor pozitivi. Pentru a extrage electronul din metal, a-l scoate în afara acestuia, este necesar să se efectueze un lucru pentru a învinge aceste forțe, numit **lucru de extracție** sau **de ieșire**. La încălzirea metalului energia cinetică medie a electronilor se mărește. Unii din ei capătă energii cinetice mai mari decât lucrul de extracție și părăsesc metalul. Cu cît temperatura metalului este mai înaltă, cu atît mai mulți electroni vor ieși în afara lui. Acest fenomen se numește **emisie termoelectronică** sau **efect Edison** și asigură purtători de sarcină electrică, deci și curent electric, în vid.

Emisia termoelectronică este similară, într-o măsură anumită, evaporării lichidului. Moleculele cu energii cinetice mai mari decât cea medie părăsesc lichidul, numărul lor fiind mai mare la temperaturi mai înalte. În vasul deschis ele se împrăstie tot mai departe de lichid. Electronii au sarcină electrică negativă, la ieșirea lor din metal acesta se încarcă pozitiv. În consecință, electronii care au părăsit metalul sînt reținuți în vecinătatea acestuia, unde formează un **nor electronic**. Acest nor împiedică ieșirea altor electroni din metal. Unii electroni din nor, mișcîndu-se haotic, se întorc în metal, alții ies, astfel stabilindu-se un echilibru dinamic între aceste două categorii de electroni. La temperaturi mai ridicate echilibrul are loc la o concentrație mai mare a electronilor în nor.

Proprietățile electrice ale tubului Edison perfecționat au fost cercetate de inginerul englez John Ambrose Fleming (1849–1945), care în 1904 a brevetat dioda cu vid. Aceasta prezintă un tub vidat cu doi electrozi. Unul din ei – anodul A – este un cilindru metalic, al doilea – catodul C – un filament situat de-a lungul axei comune a anodului și a pereților tubului (*fig. 5.62, a*). Simbolul grafic este reprezentat în *figura 5.62, b*. Catodul – filamentul –



a)



b)

Fig. 5.62

este conectat la o sursă specială de curent care îl încălzește pînă la temperaturi de ordinul a $1\,000^{\circ}\text{C}$, astfel că în jurul lui se formează norul electronic. Admitem că anodul este conectat la polul pozitiv al unei surse de curent, iar catodul – la cel negativ. În acest caz, potențialul anodului este mai mare decît al catodului ($\varphi_A > \varphi_C$), **tensiunea** este numită **directă**. Electronii din nor sînt atrași de anod și respinși de catod – prin dioda cu vid circulă curent electric. Dacă însă conectăm invers ($\varphi_A < \varphi_C$): catodul la polul pozitiv al sursei, iar anodul – la cel negativ, anodul respinge electronii, catodul îi atrage spre sine. În consecință, prin diodă nu circulă curent electric. Astfel, **prin dioda cu vid curentul circulă numai într-un sens**, ca și prin dioda semiconductoare.

Să analizăm dependența intensității curentului prin diodă de valoarea tensiunii dintre electrozi. Menționăm că la tensiune nulă prin diodă circulă curent de intensitate mică – electronii din nor cu cele mai mari viteze reușesc să ajungă la anod. Curentul se anulează la creșterea tensiunii inverse negative, la care potențialul catodului este puțin mai mare decît al anodului (fig. 5.62).

La creșterea tensiunii directe pozitive, începînd de la zero, tot mai mulți electroni ajung la anod, concentrația electronilor în nor se micșorează, ceea ce înlesnește emisia termoelectronică. În consecință, la mărirea tensiunii intensitatea curentului crește mai rapid decît direct proporțional, și legea lui Ohm nu se respectă. La creșterea de mai departe a tensiunii dintre electrozi, intensitatea încetează a crește, luînd o valoare constantă I_s – intensitatea curentului de saturație (fig. 5.63). Valoarea I_s este în funcție de temperatura catodului, ia valori mai mari la temperaturi mai înalte.

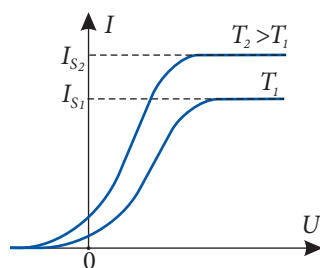


Fig. 5.63

Încălzirea catodului în dioda cercetată se datorează curentului electric care circulă prin el. A fost inventată o diodă al cărei catod are o construcție specifică: filamentul se introduce în interiorul unui tub izolator subțire, pe suprafața căruia se depune un strat de oxizi ai unor metale ca bariul, calciul, stronțitul. Acești oxizi sînt caracterizați de un lucru de extracție mai mic, dioda funcționează la temperaturi ceva mai joase ale filamentului. Pentru diodele cu catod de oxizi este caracteristică lipsa porțiunii orizontale a graficului, care exprimă intensitatea curentului în funcție de tensiunea aplicată (fig. 5.63). Catodul se distruge înainte ca intensitatea să atingă valoarea de saturație I_s . Simbolul grafic al diodei cu catod de oxizi este reprezentat în figura 5.64.

Uterior a fost construit tubul cu vid cu trei electrozi – **trioda** (simbolul grafic în fig. 5.65). Al treilea electrod – grila G, o spirală sau plasă metalică fină, este situată între catod și anod, în vecinătatea catodului. La potențialul grilei φ_G mai mare decît al catodului φ_C , electronii aflați în norul din vecinătatea catodului se accelerează, ceea ce condiționează creșterea considerabilă a intensității curentului electric prin tub. În caz contrar, la $\varphi_G < \varphi_C$, electronii sînt frînați în spațiul catod-grilă, intensitatea curentului prin tub micșorîndu-se. Astfel, variația potențialului grilei permite să se realizeze variații considerabile ale curentului prin triodă, să se amplifice semnalele electrice.

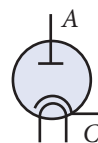


Fig. 5.64

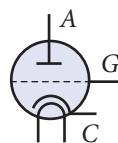


Fig. 5.65

Au fost construite și tuburi cu mai mulți electrozi, cu cele mai diverse aplicații practice.

Din cele expuse mai sus conchidem că dioda și trioda cu vid, pe de o parte, și dioda semiconductoare și tranzistorul, pe de altă parte, au proprietăți electrice similare. Tuburile cu vid au fost inventate la începutul sec. al XX-lea și s-au aflat la baza dezvoltării radioelectronicii. Inventarea tranzistorului la mijlocul sec. al XX-lea a făcut ca tuburile cu vid să fie treptat înlocuite cu elementele semiconductoare respective. Aceasta a contribuit la reducerea considerabilă a dimensiunilor multor dispozitive utilizate în electronică. Elementele semiconductoare nu necesită energie pentru încălzirea catodului, consumă mai puțină energie decât tuburile cu vid. Ultimele însă nu au fost excluse definitiv din uz. Ele se întâlnesc în instalațiile prin care circulă curenți de intensitate mare ce distrug elementele semiconductoare, de exemplu, în emițătoarele centrelor de radioteleviziune, de dirijare a navelor cosmice ș.a.

b.*Tubul cu fascicul electronic

În 1869, fizicianul german Johann Wilhelm Hittorf (1824–1914) studia descărcarea luminescentă în gaze rarefiate. Tubul cu electrozi era unit cu o pompă care evacua gazul din tub. S-a constatat că la presiuni foarte joase lumina caracteristică gazului din tub dispare, în schimb încep să lumineze unele porțiuni ale pereților tubului. Zece ani mai târziu, savantul englez William Crookes (1832–1919) a continuat cercetările lui Hittorf și a stabilit că în cazul descărcării electrice la presiuni foarte joase catodul emite o radiație deosebită, care a fost numită **raze catodice**. Au fost stabilite proprietățile acestor raze: ele produc acțiune mecanică (presiune asupra corpurilor pe care cad) și termică (corpurile pe care cad se încălzesc); frînarea lor de corpurile metalice pe care cad este însoțită de emisia razelor X (Röntgen); incidența razelor catodice pe substanțe fluorescente, de exemplu, zinc sulfurat, este însoțită de scînteierea luminoasă a locurilor respective; razele catodice sînt deviate de cîmpurile electrice și magnetice.

Natura fizică a razelor catodice a fost stabilită numai după descoperirea în 1897 a electronului de J.J. Thomson. S-a constatat că **razele catodice prezintă un fascicul de electroni** emiși de catod.

Un rol important în radioelectronică îl joacă **tuburile vidate cu fascicule de electroni**. Acestea permit transformarea semnalelor electrice în semnale vizuale la televizoare (în acest caz tubul este numit **cinescop**), în

monitoarele calculatoarelor, în oscilografe (tubul respectiv este numit **osciloscop**) ș.a.

Schema principală a unui tub cu fascicul de electroni este prezentată în figura 5.66. Filamentul F , parcurs de curentul electric, devine incandescent și încălzește catodul cu oxizi C , care emite electroni. Catodul C se află în interiorul electrodului modulator E_m , al cărui potențial este mai mic decât al catodului. În cîmpul electric

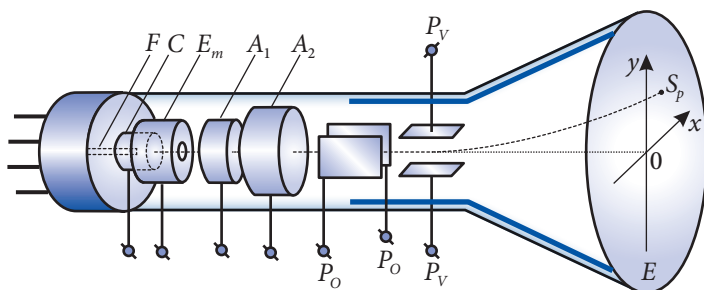


Fig. 5.66

existent între acest electrod și catod fasciculul de electroni provenit de la ultimul se subțiază. Modificarea potențialului electrodului E_m determină variația respectivă a numărului de electroni din fascicul, adică a intensității acestuia. Anozii A_1 și A_2 , de configurații speciale, au potențiale mai mari decât cele ale catodului ($\varphi_C < \varphi_{A1} < \varphi_{A2}$) și asigură atât accelerarea electronilor, cât și focalizarea lor într-un punct al ecranului E al tubului. Sistemul descris – filamentul, catodul, electrodul modulator și anozii – formează un fascicul de electroni cu viteze mari și este numit **tun electronic**.

Suprafața interioară a ecranului este acoperită cu un strat de substanță fluorescentă. În locul în care fasciculul de electroni cade pe acest strat se observă un **spot luminos** S_p .

Pentru a dirija fasciculul de electroni, adică a modifica poziția spotului luminos S_p pe ecranul E , tubul conține în interiorul său două perechi de **plăci deflectoare**, P_V și P_O , printre care trece fasciculul. Dacă potențialul plăcii superioare a perechii P_V este mai mare decât al celei inferioare, fasciculul, deci și spotul luminos, se deplasează vertical în sus, în sensul pozitiv al axei Oy , în caz contrar, vertical în jos. Respectiv, prin modificarea tensiunii dintre plăcile deflectoare P_O fasciculul de electroni este deplasat în direcție orizontală. Parcurgînd ecranul în ambele direcții, spotul luminos de diferite intensități formează imaginea vizuală transmisă prin semnalele electrice.

Tubul cu fascicul de electroni destinat obținerii imaginilor în alb-negru are un singur tun electronic, iar substanța fluorescentă de pe ecran emite lumină care se apropie după calitățile sale de lumina albă. Tuburile destinate obținerii imaginilor în culori au trei tunuri electronice, respectiv trei fascicule pentru cele trei culori complementare: verde, roșu și albastru. Structura ecranului este mult mai complicată și conține substanțe care generează culorile enumerate.

Tubul destinat transformării imaginilor vizuale în semnale electrice este numit **tub videocaptor** sau **iconoscop**. Acesta este, de asemenea, un tub vidat, dar cu o construcție diferită de cea a tubului cercetat mai sus. Succesele electronicii cu tuburi vidate sînt evidente: este suficient să menționăm doar transmiterea pe Pămînt a imaginilor color ale peisajelor planetelor Marte, Neptun ș.a.

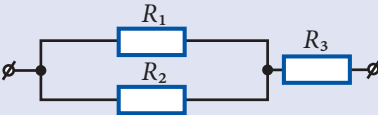
VERIFICAȚI-VĂ CUNOȘTINȚELE

1. În ce constă fenomenul emisiei termoelectronice?
2. Ce numim lucru de extracție (de ieșire) a electronului?
3. Cum se explică existența norului electronic în vecinătatea catodului încălzit?
4. Ce prezintă dioda cu vid? De ce curentul electric circulă prin ea numai într-un sens?
5. Cum se explică forma curbei ce reprezintă intensitatea curentului electric prin dioda cu vid în funcție de tensiunea dintre electrozii ei?
6. Cum poate fi modificată valoarea intensității curentului de saturație?
7. Ce funcții are trioda? De ce grila este situată în vecinătatea catodului?
- 8.*Care sînt proprietățile razelor catodice?
- 9.*Ce funcție îndeplinește tubul cu fascicul electronic?
- 10.*Care sînt părțile componente ale tunului electronic și ce destinație are fiecare din ele?
- 11.*Cum apare spotul luminos pe ecranul tubului cu fascicul electronic? Cum poate fi deplasat el?

TEST DE EVALUARE SUMATIVĂ

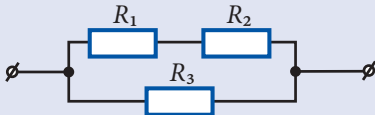
PROFIL REAL

1	Completați spațiile punctate astfel încât următoarele afirmații să fie adevărate:		
	a) Curentul electric staționar circulă prin conductor numai dacă ... este diferită de zero.	1 p.	
	b) La gruparea în ... a rezistoarelor, raportul intensităților curenților electrici prin ele este egal cu inversul raportului rezistențelor acestora.	1 p.	
	c) Descărcarea electrică în gaze care se produce numai în prezența ... este numită neautonomă.	1 p.	
2	Stabiliți (prin săgeți) corespondența dintre următoarele mărimi fizice și unitățile în care ele se exprimă:		
	Sarcina electrică •	• Ω/m	1 p.
	Intensitatea curentului electric •	• $\Omega \cdot m$	1 p.
	Rezistența electrică •	• A	1 p.
	Rezistivitatea substanței •	• $A \cdot s$	1 p.
		• V/A	
3	Determinați valoarea de adevăr a următoarelor afirmații, marcând „A” dacă afirmația este adevărată și „F” dacă afirmația este falsă:		
	a) Curentul electric este staționar dacă sensul în care circulă el nu se modifică în timp.	<input type="checkbox"/>	1 p.
	b) Sarcina electrică ce a traversat secțiunea transversală a conductorului într-un interval de timp este egală cu raportul dintre intensitatea curentului prin conductor și acest interval de timp.	<input type="checkbox"/>	1 p.
	c) Disocierea electrolitică are loc numai în prezența curentului electric prin electrolit.	<input type="checkbox"/>	1 p.
	Itemii 4 și 5 sînt alcătuiți din cîte două afirmații legate între ele prin conjuncția deoarece . Stabiliți dacă afirmațiile sînt adevărate (scriind A) sau false (scriind F) și dacă între ele există relația cauză–efect (scriind da sau nu).		

4	Sarcina electrică totală a unui semiconductor ce conține atomi donori este negativă, deoarece acest semiconductor prezintă un cristal tetravalent, în care sînt introduși atomi pentavalenți.	
	Răspuns:	3 p.
	afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .	
5	Șuntul se leagă în paralel cu ampermetrul, deoarece la legarea în paralel intensitatea curentului electric prin ampermetru constituie doar o parte a intensității curentului din rețea.	
	Răspuns:	3 p.
	afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .	
6	La catodul unei băi electrolitice prin care circulă un curent electric cu intensitatea de 2,5 A în 50 min. s-au depus 4,65 g de cositor. Să se determine:	
	a) echivalentul electrochimic al cositorului;	2 p.
	b) intervalul de timp în care la catod s-ar depune 8,37 g de cositor la o intensitate a curentului prin baie egală cu 7,5 A.	2 p.
7	Trei rezistoare avînd rezistența $R_1 = 3 \Omega$, $R_2 = 6 \Omega$ și $R_3 = 4 \Omega$ sînt grupate după schema din figura alăturată. Să se determine:	
		
	a) rezistența totală a grupării;	2 p.
	b) intensitatea curenților prin rezistoarele 2 și 3 dacă intensitatea curentului prin rezistorul 1 are valoarea $I_1 = 3 \text{ A}$;	3 p.
	c) tensiunea electrică aplicată grupării.	2 p.
8	Dacă la o sursă de curent continuu este conectat un consumator cu rezistența $R_1 = 11 \Omega$, puterea electrică dezvoltată în el $P_1 = 99 \text{ W}$, iar dacă acesta este înlocuit cu un alt consumator a cărui rezistență $R_2 = 17 \Omega$, puterea dezvoltată devine $P_2 = 68 \text{ W}$. Determinați:	
	a) tensiunea electromotoare a sursei de curent;	4 p.
	b) rezistența interioară a sursei;	2 p.
	c) randamentul circuitului electric în ambele cazuri.	3 p.

PROFIL UMANIST

1	Completați spațiile punctate astfel încât următoarele afirmații să fie adevărate:		
	a) Curentul electric prezintă mișcarea ... a particulelor purtătoare de sarcină electrică.	1 p.	
	b) În exteriorul sursei de curent sarcinile electrice pozitive se deplasează de la borna ... la cea ..., iar în interiorul ei – de la borna ... la cea	1 p.	
	c) Procesul de descompunere a moleculelor substanței în ... se numește disociere electrolitică.	1 p.	
2	Stabiliți (prin săgeți) corespondența dintre următoarele mărimi fizice și unitățile în care ele se exprimă:		
	Sarcina electrică •	• Ω	1 p.
	Intensitatea curentului electric •	• $A \cdot s$	1 p.
	Rezistența electrică •	• V	1 p.
	Rezistivitatea substanței •	• $\Omega \cdot m$	1 p.
		• A	
3	Determinați valoarea de adevăr a următoarelor afirmații, marcând „A” dacă afirmația este adevărată și „F” dacă afirmația este falsă:		
	a) În lipsa câmpului electric exterior, purtătorii liberi de sarcină electrică din conductor efectuează atât mișcare haotică, cât și mișcare ordonată.	<input type="checkbox"/>	1 p.
	b) Rezistența conductorului omogen de secțiune constantă este direct proporțională cu lungimea lui și cu aria secțiunii transversale.	<input type="checkbox"/>	1 p.
	c) Conducția electronică a semiconductoarelor cu impurități este numită intrinsecă.	<input type="checkbox"/>	1 p.
	Itemii 4 și 5 sînt alcătuiți din cîte două afirmații legate între ele prin conjuncția deoarece . Stabiliți dacă afirmațiile sînt adevărate (scriind A) sau false (scriind F) și dacă între ele există relația cauză–efect (scriind da sau nu).		
4	Intensitatea curentului electric în conductor este determinată de sarcina electrică ce traversează secțiunea transversală a lui într-o unitate de timp, deoarece rezistența conductorului este egală cu raportul dintre tensiunea electrică dintre capetele lui și intensitatea curentului prin el.		
	Răspuns:		3 p.
	afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .		

5	Rezistența conductorului depinde numai de dimensiunile lui geometrice, deoarece sînt conductoare substanțele în care există purtători liberi de sarcină electrică.	
	Răspuns:	3 p.
	afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .	
6	Printr-un conductor circulă curent electric continuu și în 20 s secțiunea transversală a lui este traversată de o sarcină electrică egală cu 12 C. Să se determine:	
	a) intervalul de timp în care secțiunea transversală este traversată de o sarcină electrică de 15 C;	2 p.
	b) intensitatea curentului electric din conductor.	2 p.
7	Se dă gruparea de rezistoare din figura alăturată, în care valorile rezistențelor sînt: $R_1 = 3\Omega$, $R_2 = 9\Omega$ și $R_3 = 6\Omega$. Să se determine:	
		
	a) rezistența totală a grupării de rezistoare;	2 p.
	b) intensitatea curentului prin rezistorul R_3 , dacă curentul care circulă prin rezistorul R_2 are intensitatea egală cu 0,7 A.	3 p.
8	La bornele unei surse de curent, avînd tensiunea electromotoare de 4,5 V și rezistența interioară de 0,2 Ω , este conectat un consumator cu rezistența de 8,8 Ω . Să se calculeze:	
	a) intensitatea curentului din circuit;	3 p.
	b) cantitatea de căldură degajată în consumator pe parcursul a 2 minute.	2 p.



RĂSPUNSURI LA PROBLEME

Capitolul I. TEORIA CINETICO-MOLECULARĂ A GAZULUI IDEAL

- § 1.2 9. 44; 0,044 kg/mol; 10. $2,7 \cdot 10^{-26}$ kg; 11. $6,7 \cdot 10^{22}$, $6 \cdot 10^{21}$;
12. $5,4 \cdot 10^{21}$; 13. $1,97 \cdot 10^{25}$; 14. 7,3 kg; 15. $1,9 \cdot 10^{19} \text{ s}^{-1}$; 16. 5,9 nm.
- § 1.5 4. 1 581 m/s; 5. $2,26 \cdot 10^{17}$; 6. 300 J; 7. 0,4 MPa; 8. 0,4 mN.
- § 1.6 6. $-40^\circ\text{C} = -40^\circ\text{F}$, $574,25 \text{ K} = 574,25^\circ\text{F}$; 7. 35°C .
- § 1.7 4. $2,65 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$; 5. 2 000 K; 6. 0,028 kg/mol; 7. $4,17 \text{ kg/m}^3$.
- § 1.8 11. 10 m; 12. 10^5 Pa ; 13. 30 kPa; 14. 10 m^3 ; 15. 30 cm; 16. 300 K;
17. 1 MPa; 18. 500 K; 19. 10 kg; 21. $2,57 \cdot 10^5 \text{ Pa}$; 22. 660 K;
24. 289 K; 25. 1 kg/m^3 ; 26. $4 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$, heliu;
27. 8,31 kPa, 24,93 kPa; 28. $0,6 \text{ kg/m}^3$.

Capitolul II. BAZELE TERMODINAMICII

- § 2.1 6. -210 J; 7. -520 J; 8. 199,4 J; 9. 7 L.
- § 2.2 5. 60 kJ (în procesul 1a2) și 30 kJ (în procesul 1b2); 6. 225 kJ.
- § 2.3 6. 73°C ; 7. $m_1c_1 + m_2c_2$.
- § 2.4 6. 140 J; 7. 1 500 J; 8. $3,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$; 9. 6 kJ, 15 kJ; 10. 360 K.
11. $M = 0,032 \text{ kg/mol}$, oxigenul.
- § 2.5 7. 23%; 8. 960 J; 9. 300%; 10. 1 160 J.
- § 2.6 8. 60%; 9. 470 K; 10. 190 kJ; 11. 490 K.

Capitolul III. LICHIDE ȘI SOLIDE. TRANSFORMĂRI DE FAZĂ

- § 3.2 8. 50 μJ ; 9. 0,125 mJ; 10. 0,022 N/m; 11. 180 mm.
- § 3.4 8. $5 \cdot 10^{-4}$; 9. a) 10^7 Pa , b) $1,4 \cdot 10^{-4}$, c) 0,28 mm.
- § 3.5 7. 200,072 cm^3 ; 8. 2,5%; 9. 353°C .
- § 3.6 12. 0,0104 kg/m^3 ; 13. 42%; 14. $8,5^\circ\text{C}$; 15. 6,5 kg; 16. 2,68 MJ.
- § 3.7 9. $\approx 1060 \text{ m/s}$; 10. $\approx 400 \text{ K}$.
- § 3.8 4. 24°C ; 5. 892,5 J/(kg \cdot K); 6. 2 140 J/(kg \cdot K); 7. 250 J/(kg \cdot K); 8. 1,01 kg.



Capitolul IV. ELECTROSTATICA

- § 4.1 2. S-a micșorat cu $3,2 \cdot 10^{-6}$ kg; 3. $-0,8 \mu\text{C}$; 4. $q_A = q_B = +0,6 \mu\text{C}$, bila B a cedat bilei A un număr de $7,5 \cdot 10^{12}$ electroni; 7. $1,5 \text{ mN}$; 8. $2,5 \text{ mN}$; 9. $2,1 \cdot 10^{-7} \text{ C}$.
- § 4.2 4. 14 mN ; 5. 625 N/C ; 6. $5 \cdot 10^4 \text{ N/C}$; 7. La distanța de 5 cm de la sarcina q , pe segmentul dintre sarcini.
- § 4.3 5. $4,5 \text{ mJ}$; 6. 430 V ; 7. $4,2 \cdot 10^6 \text{ m/s}$; 8. $3\sqrt{2} \text{ kV}$; 9. 60 V ; 10. Sarcina pozitivă are modulul de două ori mai mare decât modulul celei negative; 11. $5,9 \cdot 10^6 \text{ m/s}$.
- § 4.5 3. $0,02 \text{ m}$; 4. $0,162 \text{ m}$; 5. $2,1$; 6. $3,2 \cdot 10^{-3} \text{ N}$.
- § 4.6 7. 70 nF ; 8. $1\,215 \text{ pF}$; 9. 129 V ; 10. 280 pF , 56 nC ; 11. 150 V ; 12. 2 nF , 3 nF ; 13. $2,2 \mu\text{F}$, în paralel; 14. $6,67 \mu\text{F}$ în ambele cazuri; 15. 240 pF ; 16. $1,08 \mu\text{C}$; $5,4 \text{ V}$; $3,6 \text{ V}$; 17. 48 pF .
- § 4.7 3. S-a mărit de 9 ori; 4. 40 V ; 5. a) Se mărește de 2 ori; b) Se micșorează de 2 ori; 6. $+4,5 \cdot 10^{-7} \text{ J}$; 7. $2,88 \mu\text{J}$; $4,80 \mu\text{J}$; 8. $4 \cdot 10^{-7} \text{ J}$; 9. 103 J/m^3 .
- § 4.8 2. $4U_0$; 3. Energiile cinetice sînt egale, $v_1/v_2 = \sqrt{m_2/m_1}$; 5. $3,4 \cdot 10^5 \text{ m/s}$, $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$; 6. $1,44 \text{ cm}$, $3,74 \cdot 10^5 \text{ m/s}$; 7. $2,96 \cdot 10^7 \text{ m/s}$.



Capitolul V. ELECTROKINETICA.

CURENTUL ELECTRIC ÎN DIFERITE MEDII

- § 5.1 7. $7,5 \text{ C}$; 8. $1,2 \text{ A}$; 9. 18 C ; $1,5 \text{ A}$; 10. În nod intră curent cu intensitatea de $0,5 \text{ A}$; 11. $7,5 \text{ C}$, 10 C .
- § 5.2 11. $0,6 \text{ A}$; 25Ω ; 12. 60 m ; 13. $4,2 \Omega$; $3,2 \Omega$; 14. 9 kJ ; 15. 4 A ; 16. 3Ω ; $0,75 \text{ W}$; 75% .
- § 5.3 5. $R_A/R_S=14$; 6. $0,002 \Omega$; 7. De 10 ori.
- § 5.5 9. $5 \cdot 10^{-14} \text{ s}$; 10. $3,6 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$; $4,8 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$; 11. $2\,530^\circ\text{C}$.
- § 5.7 12. $5 \cdot 10^3 \text{ C}$; 13. $3,3 \cdot 10^{-7} \text{ kg/C}$; 14. 35 min .

**Manualul acesta este proprietatea
Ministerului Educației al Republicii Moldova**

Liceul _____

Manualul nr. _____

Nr. crt.	Numele și prenumele elevului	Anul școlar	Aspectul manualului	
			la primire	la restituire
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
6.				
7.				

- Dirigintele controlează dacă numele elevului este scris corect.
- Elevul nu trebuie să facă niciun fel de însemnări în manual.
- Aspectul manualului (la primire și la restituire) se va aprecia folosind termenii: *nou, bun, satisfăcător, nesatisfăcător*.

