Materiale didactice suport
pentru pregătirea pentru examenul de bacalaureat la disciplina

FIZICĂ

B. ELEMENTE DE TERMODINAMICĂ

Elaborat de
lect. univ. dr. Gabriel Pascu

Material elaborat în cadrul proiectului CNFIS-FDI-2021-0471 „UVT – Acces și echitate în învățământul superior”

Cuprins

Capitolul I – Noțiuni termodinamice de bază

I.1. Mărimi fizice definite la nivel macroscopic

Gazul este un ansamblu macroscopic alcătuit dintr-un număr mare de molecule. La nivel macroscopic, este caracterizat de anumiți parametri – numiți parametri de stare. Unele din aceste mărimi sunt fundamentale în Sistemul Internațional de Unități, altele derivate, dar fiecare având în acest sistem o unitate de măsură. În practică apar în mod uzual și alte unități de măsură, sau se folosesc multipli sau submultipli acestora:

- volumul, $[V]_{\mathrm{SI}} = \mathrm{m}^3$.
  Unități folosite în practică:
  - litrul, $1\ \mathrm{L} = 1\ \mathrm{dm}^3 = 10^{-3}\ \mathrm{m}^3$,
  - mililitrul, $1\ \mathrm{mL} = 1\ \mathrm{cm}^3 = 10^{-6}\ \mathrm{m}^3$;

- presiunea, $[p]_{\mathrm{SI}} = \mathrm{N/m}^2 = \mathrm{Pa}$ (Pascal)
  Unități folosite în practică:
  - atmosfera: $1\ \mathrm{atm} = 101325\ \mathrm{Pa} \cong 10^5 \mathrm{N/m}^2$,
  - torrul (milimetru coloană mercur): $1\ \mathrm{atm} = 760\ \mathrm{mmHg}$;

- temperatura, $[T]_{\mathrm{SI}} = \mathrm{K}$ (Kelvin – mărime fundamentală în SI)
  Unități folosite în practică:
  - grad Celsius: $t(°\mathrm{C}) = T(\mathrm{K}) - 273$ (sau $273{,}15$).
  Atenție: ca interval, $\Delta t(°\mathrm{C}) = \Delta T(\mathrm{K})$!!

Prin condiții normale de temperatură și presiune, înțelegem: $t_o = 0\ °\mathrm{C}$ ($T_o = 273$ K) și $p_o = 1\ \mathrm{atm}$.

- masa: $[m]_{\mathrm{SI}} = \mathrm{kg}$ (kilogram – mărime fundamentală în SI)
  Unități folosite în practică:
  - gramul: $1\mathrm{g} = 10^{-3}\mathrm{kg}$

- densitatea: $[\rho]_{\mathrm{SI}} = \mathrm{kg/m}^3$, $\rho = \frac{m}{V}$.
  Unități folosite în practică:
  - gram pe centimetru cub (sau pe mililitru): $1\ \mathrm{g/cm}^3 = 1000\ \mathrm{kg/m}^3$

I.2. Mărimi fizice ce țin cont de natura discretă a substanței

Dacă până acum ne-am referit la mărimi care caracterizau ansamblul din punct de vedere macroscopic, există anumite mărimi care țin cont de caracterul discret al gazului, adică de faptul că acesta este alcătuit din molecule:

- numărul de particule (molecule): $[N]_{\mathrm{SI}} = 1$ (adimensional);
- concentrația de particule (molecule): $[n]_{\mathrm{SI}} = \mathrm{m}^{-3}$ (molecule/metru cub), $n = \frac{N}{V}$;
- numărul de moli: $[\nu]_{\mathrm{SI}} = \mathrm{mol}$ (mărime fundamentală în SI),
  $\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{\mu} = \frac{V}{V_\mu}$, unde:
- numărul lui Avogadro: $[N_A]_{\mathrm{SI}} = \mathrm{mol}^{-1}$ (molecule/mol), $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}\ \mathrm{mol}^{-1}$ (numărul de molecule dintr-un mol de substanță);
- masa molară: $[\mu]_{\mathrm{SI}} = \mathrm{kg/mol}$ – caracteristică fiecărei substanțe (dată fiind formula chimică, μ se calculează ca suma maselor atomice A ale tuturor atomilor constituenți);
- volumul molar: $[V_\mu]_{\mathrm{SI}} = \mathrm{mol/m^3}$, $V_\mu = \frac{V}{\nu}$.

  Atenție: doar în condiții normale de presiune și temperatură, volumul molar (în condiții normale): $V_{\mu o} = 22{,}4\ \mathrm{L/mol}$.
- masa unei molecule: $[m_o]_{\mathrm{SI}} = \mathrm{kg}$, $m_o = \frac{m}{N} = \frac{\mu}{N_A}$.

I.3. Amestecuri de gaze

Pentru un amestec de gaze, masa molară medie se poate calcula împărțind masa totală a amestecului la numărul total de moli din amestec: $\bar{\mu} = \frac{m_{am}}{\nu_{am}}$.

Alternativ, putem considera:

- două substanțe cu nr. de particule (molecule) N_1 și N_2, număr de moli ν_1 și ν_2 și mase molare μ_1 și μ_2 (se poate extinde de la 2 la orice număr);
- numărul de particule (molecule) din amestec: $N_{am} = N_1 + N_2$;
- cantitatea de substanță din amestec: $\nu_{am} = \nu_1 + \nu_2$
- fracțiile molare ale componentelor amestecului (procentele molare din fiecare component):
  $x_1 = \frac{\nu_1}{\nu_{am}} = \frac{N_1}{N_{am}}$, $x_2 = \frac{\nu_2}{\nu_{am}} = \frac{N_2}{N_{am}}$

În acest caz, masa molară a unui amestec devine: $\mu_{am} = x_1\mu_1 + x_2\mu_2$.

I.4. Ecuația de stare a gazului ideal

Între parametri de stare ai gazului se poate scrie egalitatea:

- ecuația de stare a gazului ideal: $pV = \nu RT$
  (sau $pV_\mu = RT$ sau $pV = \frac{m}{\mu}RT$), unde:
  - constanta gazelor ideale: $[R]_{\mathrm{SI}} = \mathrm{J/(mol \cdot K)}$, $R = 8{,}31\ \mathrm{J/(mol \cdot K)}$
- forma locală a ecuație de stare a gazului ideal: $p\mu = \rho RT$
- o altă formă a ecuației de stare a gazului ideal: $p = nk_BT$ (sau $pV = Nk_BT$), unde:
  - constanta lui Boltzmann: $k_B = \frac{R}{N_A}$.

Test conținând noțiunile din capitolul I

Se consideră cunoscute: numărul lui Avogadro N_A = 6,02·10^{23} mol^{-1}, constanta gazelor ideale R = 8,31 J·mol^{-1}·K^{-1}. Între parametrii de stare ai gazului ideal într-o stare dată există relația: $pV=\nu RT$.

I. Pentru itemii 1-5 scrieți pe foaia de răspuns litera corespunzătoare răspunsului corect. (15 puncte)

1. Mărimea fizică ce poate fi exprimată cu ajutorul unității de măsură $\mathrm{N \cdot m^{-2}}$ este:
a. lucrul mecanic; **b.** căldura specifică; **c.** presiunea; **d.** volumul. **(3p)**
Răspuns corect: c.
Explicație: $\mathrm{N \cdot m^{-2}}$ este echivalent cu $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m^2}} = \mathrm{Pa}$, pascalul fiind unitatea de măsură pentru presiune.

2. Folosind simbolurile tipice din manualele de fizică, masa unei molecule se poate exprima în funcție de masa molară și numărul lui Avogadro ca:
a. $\mu \cdot N_A$; **b.** $\mu^{-1} \cdot N_A$; **c.** $\mu \cdot N_A^{-1}$; **d.** $\mu^{-1} \cdot N_A^{-1}$. **(3p)**
Răspuns corect: b.
Explicație: Masa unei molecule se poate scrie împărțind masa totală a gazului m la numărul de molecule N: $m_o = \frac{m}{N}$. Dar masa m se mai poate scrie și în funcție de numărul de moli υ ca: $m = \upsilon \cdot \mu$, iar numărul de molecule ca: $N = \upsilon \cdot N_A$, de unde $m_o = \frac{\mu}{N_A}$.

3. Numărul de molecule ce sunt conținute într-o masă de 128 kg de oxigen (O_2, cu masa molară $\mu = 32$ g/mol) este (aproximativ) egală cu:
a. $24 \cdot 10^{23}$; **b.** $4 \cdot 10^{26}$; **c.** $24 \cdot 10^{26}$; **d.** $4 \cdot 10^{23}$. **(3p)**
Răspuns corect: c.
Explicație: Numărul de moli de oxigen este $\upsilon = \frac{m}{\mu} = \frac{128\ \mathrm{kg}}{32\ \mathrm{g/mol}} = 4000\ \mathrm{mol} = 4 \cdot 10^3\ \mathrm{mol}$. Deci numărul de molecule va fi: $N = 4 \cdot 10^3\ \mathrm{mol}\ \cdot\ 6{,}02 \cdot 10^{23}\ \mathrm{mol^{-1}} \cong 24 \cdot 10^{26}$ molecule.

4. Pentru un gaz ideal care are densitatea ρ, masa m, volumul V, aflându-se la temperatura T și presiunea p, putem calcula masa molară ca:
a. $\frac{\rho RT}{p}$; **b.** $\frac{mRT}{\rho}$; **c.** $\frac{\rho V}{RT}$; **d.** $\frac{mRT}{V}$. **(3p)**
Răspuns corect: a.
Explicație: Din forma locală a ecuației de stare a gazului ideal, $p\mu = \rho RT$, reiese că $\mu = \frac{\rho RT}{p}$.

5. 3 moli de gaz ideal se află la presiunea de $1{,}662 \cdot 10^5$ Pa și temperatura 27°C. Volumul ocupat de gaz este:
a. 45 litri; **b.** 200 cm^3; **c.** 200 m^3; **d.** 45 m^3. **(3p)**
Răspuns corect: a.
Explicație: Din ecuația de stare a gazului ideal, $pV = \nu RT$, se poate exprima volumul ca: $V = \frac{\nu RT}{p} = \frac{3 \text{ mol} \cdot 8{,}31 \text{ J/(mol·K)} \cdot 300 \text{ K}}{1{,}662 \cdot 10^5 \text{ Pa}} = \frac{8{,}31 \cdot 900 \text{ J}}{16{,}62 \cdot 10^4 \text{ Pa}} = 0{,}045 \text{ m}^3 = 45$ litri, unde avem grijă să exprimăm temperatura în Kelvini: $T = (273 + 27) \text{ K} = 300 \text{ K}$.

II. Rezolvați următoarea problemă: (15 puncte)

Într-un laborator se află o butelie de 10 litri închisă etanș, având pereți rigizi, ce conține un amestec de gaze, considerate ideale, cu masa molară medie a amestecului $\mu = 34$ g/mol. În vas se găsesc $N_1 = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ molecule de heliu (cu masa molară $\mu_1 = 4$ g/mol), precum și N_2 molecule de dioxid de carbon (cu masa molară $\mu_2 = 44$ g/mol).
a. Calculați masa de heliu ce se află în butelie.
b. Calculați numărul de molecule de dioxid de carbon ce se află în butelie.
c. Determinați numărul de molecule din unitatea de volum a buteliei (concentrația de molecule).
d. Determinați densitatea amestecului de gaze din butelie.

Rezolvare:

a Masa de heliu este dată de formula $m_1 = \mu_1 \cdot \nu_1$. Numărul de moli de heliu este $\nu_1 = \frac{N_1}{N_A} = 1$ mol, deci masa va fi $m_1 = 4 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 1 \text{ mol} = 4$ g.
b. Masa molară medie a amestecului este $\mu_{am} = x_1\mu_1 + x_2\mu_2$, unde x_1 și $x_2 = 1 - x_1$ sunt fracțiile molare corespunzătoare heliului și dioxidului de carbon. Atunci, înlocuind cu valorile numerice ale maselor molare, se obține ecuația $34 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 4 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot x_1 + 44 \frac{\text{g}}{\text{mol}} (1 - x_1)$, adică $34 = 4x_1 + 44 - 44x_1$, de unde $-10 = -40x_1$, adică $x_1 = \frac{1}{4}$. Cum $x_1 = \frac{N_1}{N_1 + N_2}$, rezultă că $N_1 + N_2 = 4N_1$, adică $N_2 = 3N_1 = 3 \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23}$ molecule $= 18{,}06 \cdot 10^{23}$ molecule.
c. Numărul total de molecule din butelie este $N = N_1 + N_2 = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ molecule $+ 18{,}06 \cdot 10^{23}$ molecule $= 24{,}08 \cdot 10^{23}$ molecule. Atunci, concentrația de molecule din butelie este $n = \frac{N}{V} = \frac{24{,}08 \cdot 10^{23} \text{ molecule}}{10 \text{ litri}} = \frac{24{,}08 \cdot 10^{23} \text{ molecule}}{10^{-2} \text{ m}^3} = 2{,}408 \cdot 10^{24} \frac{\text{molecule}}{\text{m}^3}$.
d. Densitatea amestecului este $\rho = \frac{m}{V}$. Masa amestecului este dată de masa celor două componente: $m = m_1 + m_2$, masa de heliu fiind anterior calculată ca $m_1 = 4$ g. Numărul de moli de dioxid de carbon este: $\nu_2 = \frac{N_2}{N_A} = 3$ moli, de unde masa de dioxid de carbon este $m_2 = \mu_2 \cdot \nu_2$, adică $m_1 = 44 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 3 \text{ mol} = 132$ g. Atunci masa totală a amestecului este $m = 4 \text{ g} + 132 \text{ g} = 136$ g, de unde densitatea $\rho = \frac{136 \text{ g}}{10 \text{ litri}} = \frac{136 \cdot 10^{-3} \text{ kg}}{10^{-2} \text{ m}^3} = 13{,}6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

III. Rezolvați următoarea problemă: (15 puncte)

Într-un vas etanș cu pereții rigizi se află o cantitate $\upsilon = 2$ moli de azot ($\mu_1 = 28\ \mathrm{g/mol}$) aflată la presiunea $p = 10^5$ Pa și temperatura $t = 27$°C.

a. Calculați masa de azot din vas.

b. Calculați numărul de molecule de azot din vas.

c. Determinați volumul vasului.

d. Dacă se conectează printr-un tub vasul cu unul cu dimensiuni identice, dar care conține o masă egală de oxigen ($\mu_2 = 32\ \mathrm{g/mol}$), determinați masa molară a amestecului după stabilirea echilibrului.

Rezolvare:

a. Masa de azot este dată de formula $m_1 = \mu_1 \cdot \nu_1$. adică $m_1 = 28\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{mol}} \cdot 2\ \mathrm{mol} = 56\ \mathrm{g}$.

b. Numărul de molecule de azot este: $N_1 = \nu_1 \cdot N_A$, adică $N_1 = 2\ \mathrm{mol} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23}\frac{\mathrm{molecule}}{\mathrm{mol}} = 12{,}04 \cdot 10^{23}$ molecule.

c. Volumul gazului se poate determina din ecuația de stare $pV = \nu RT$. Temperatura în Kelvini este $T = (273 + 27)\ \mathrm{K} = 300\ \mathrm{K}$, iar volumul $V = \frac{\nu RT}{p}$, adică $V = \frac{2\ \mathrm{mol} \cdot 8{,}31\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol \cdot K}} \cdot 300\ \mathrm{K}}{10^5\ \mathrm{Pa}} \cong 0{,}05\ \mathrm{m}^3$.

d. Masa de oxigen va fi, conform enunțului, $m_2 = m_1 = 56$ g, ceea ce corespunde la o cantitate de substanță $\nu_2 = \frac{m_2}{\mu_2}$, adică $\nu_2 = \frac{56\ \mathrm{g}}{32\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{mol}}} = 1{,}75\ \mathrm{mol}$. Numărul total de moli de amestec este $\nu_{am} = \nu_1 + \nu_2$, adică $\nu_{am} = 2\ \mathrm{mol} + 1{,}75\ \mathrm{mol} = 3{,}75\ \mathrm{mol}$. Atunci, fracțiile molare pentru cele două componente sunt: $x_1 = \frac{\nu_1}{\nu_{am}}$, adică $x_1 = \frac{2}{3{,}75} = \frac{2}{3+\frac{3}{4}} = \frac{8}{15}$, iar $x_2 = 1 - x_1$, adică $x_2 = \frac{7}{15}$. Atunci, masa molară a amestecului este $\mu_{am} = x_1\mu_1 + x_2\mu_2$, adică $\mu_{am} = \frac{8}{15} \cdot 28\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{mol}} + \frac{7}{15} \cdot 32\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{mol}} = \frac{448}{15}\ \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{mol}} \cong 29{,}9\ \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{mol}}$.

Capitolul II – Legile gazului ideal

II.1. Transformări simple ale gazului ideal

Dacă o cantitate constantă ($\nu = \text{const.}$) de gaz ideal, suferă o transformare, atunci între două stări 1 și 2 ale aceluiași gaz sunt valabile legile:

- Când presiunea este constantă ($p = \text{const.}$), legea transformării izobare:

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

- Când volumul este constant ($V = \text{const.}$), legea transformării izocore:

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

- Când temperatura este constantă ($T = \text{const.}$), legea transformării izoterme:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 ,$$

În general pot exista și alte tipuri de transformări! (orice dependență între p,V,T)

Dacă o cantitate constantă ($\nu = \text{const.}$) de gaz ideal, suferă o transformare adiabatică ($Q = 0$), atunci între două stări 1 și 2 ale aceluiași gaz sunt valabile legile:

- În coordonate $p - V$ ($pV^\gamma = \text{const.}$):

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma ,$$

- În coordonate $T - V$ ($TV^{\gamma-1} = \text{const.}$):

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1} ,$$

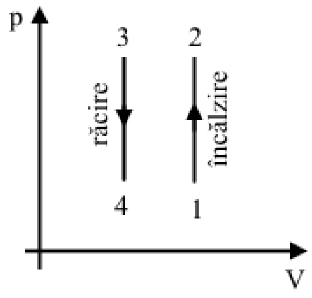
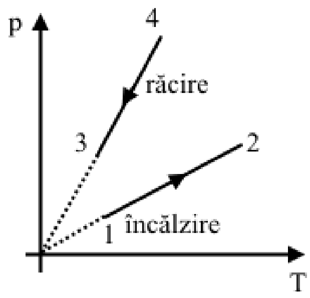
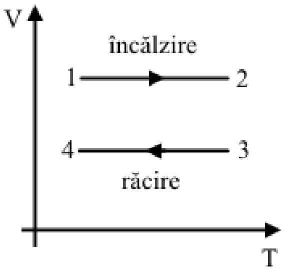
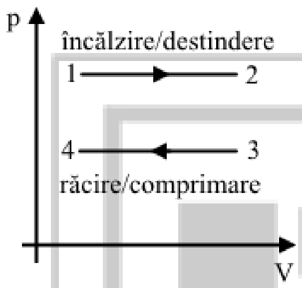
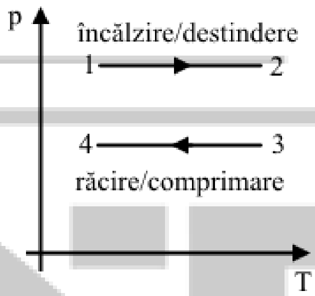
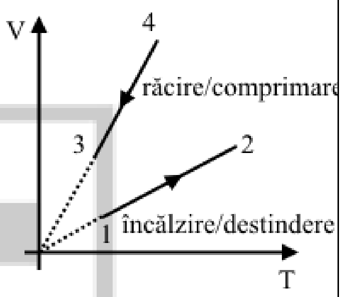
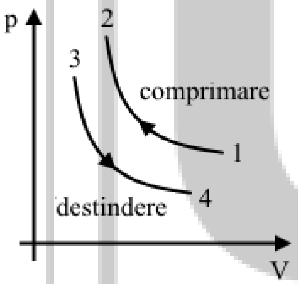
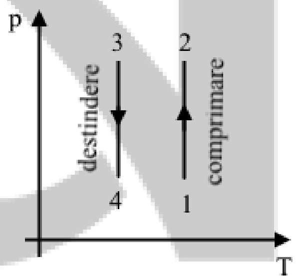
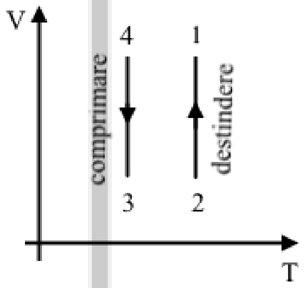
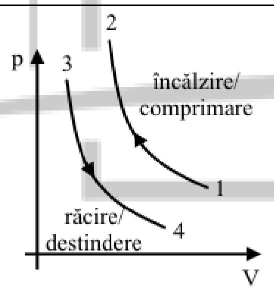
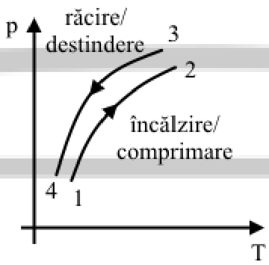
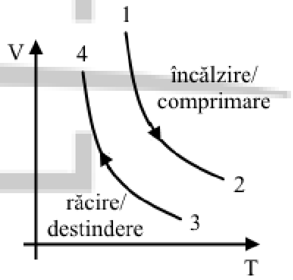
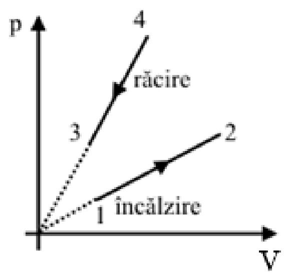
- În coordonate $T - p$ ($Tp^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \text{const.}$):

$$T_1 p_1^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_2 p_2^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} ,$$

unde $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$ este exponentul adiabatic al gazului.

Gazul poate suferi și alte transformări, mai generale. Un caz particular este al transformării politrope (politropice), unde $pV^n = \text{const.}$, unde n (numit indice/index) poate fi orice număr real. În particular, pentru $n = -1$, avem $\frac{p}{V} = \text{const.}$, adică $pV^{-1} = \text{const.}$, numită politropă de indice 1.

II.2. Grafice pentru transformări ale gazului ideal

	Coordonate $p - V$	Coordonate $p - T$	Coordonate $V - T$
IZOCORĂ			
IZOBARĂ			
IZOTERMĂ			
ADIABATĂ			
POLITROPĂ DE INDEX -1			

II.3. Gaze ideale separate de pistoane

- Două gaze pot fi separate printr-un perete sau un piston, în două compartimente (notate cu A, B). De asemenea, în locul unuia din compartimente se poate afla atmosfera (de presiune constantă p_o)
- Din punct de vedere al transferului căldurii între cele două compartimente, și al temperaturilor lor, pereții pot fi:

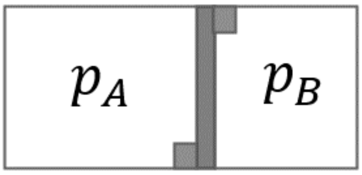
- Termoconductori, când căldura poate fi transferată, iar la echilibru avem

$$T_B = T_A,$$

- Izolatori termic, când căldura nu poate fi transferată (peretele este adiabatic), iar la echilibru avem

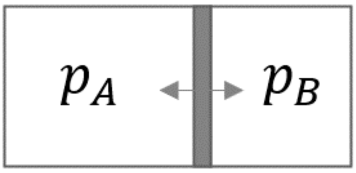
$$T_B \neq T_A,$$

- Similar, în cazul presiunilor, pereții pot fi:



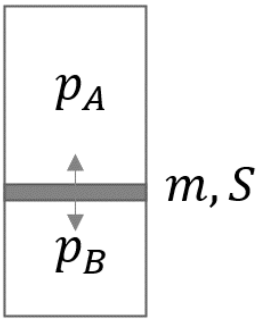
- În cazul unui perete (considerat în general fix), sau unui piston blocat, presiunea în cele două compartimente este diferită, neexistând o relație între cele două valori:

$$p_B \neq p_A,$$



- În cazul unui piston orizontal ce se mișcă fără frecări, presiunile în cele două compartimente sunt egale:

$$p_B = p_A,$$



- În cazul unui piston vertical ce se mișcă fără frecări, presiunea în compartimentul inferior (B) este mai mare decât cea în compartimentul superior (A), datorită presiunii exercitate de piston însuși. Pentru un piston de masă m și secțiune S, și unde g este accelerația gravitațională (de obicei în probleme să indică $g \approx 10\ \mathrm{m/s^2}$):

$$p_B = p_A + \frac{mg}{S}.$$

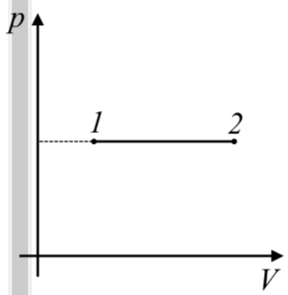
Test conținând noțiunile din capitolul II

Se consideră cunoscute: numărul lui Avogadro N_A = 6,02·10^{23} mol^{-1}, constanta gazelor ideale R = 8,31 J·mol^{-1}·K^{-1}. Între parametrii de stare ai gazului ideal într-o stare dată există relația: $pV=\nu RT$.

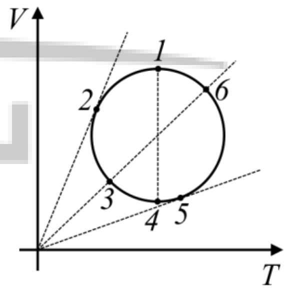
I. Pentru itemii 1-5 scrieți pe foaia de răspuns litera corespunzătoare răspunsului corect. (15 puncte)

1. Fie dată o masă constantă de gaz ideal. Raportul dintre densitatea gazului și presiunea sa este constantă în transformări:
a. izobare; **b.** izocore; **c.** izoterme; **d.** adiabatice. **(3p)**
Răspuns corect: c.
Explicație: Din ecuația $p\mu = \rho RT$, putem exprima raportul $\frac{\rho}{p} = \frac{RT}{\mu}$, deci $\frac{\rho}{p}$ este constant, când temperatura este constantă, adică într-o transformare izotermă.

2. Fie o transformare a unei cantități constante de gaz ideal, care este reprezentată în figura alăturată în coordonate $p - V$. Ce se întâmplă cu temperatura dacă volumul gazului crește de 3 ori?
a. scade de 3 ori; **b.** crește de 3 ori; **c.** scade de 9 ori; **d.** crește de 9 ori. **(3p)**
Răspuns corect: b.
Explicație: Transformarea se realizează la presiune constantă, deci este izobară. În aceste condiții, temperatura este direct proporțională cu volumul: dacă volumul crește de 3 ori, și temperatura crește tot de 3 ori.



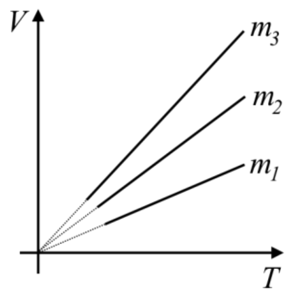
3. În diagrama alăturată, este reprezentată o transformare ciclică a unei mase de gaz ideal. Perechea de stări care au aceeași presiune este:
a. 1 și 5 **b.** 2 și 6 **c.** 3 și 4 **d.** 3 și 6 **(3p)**
Răspuns corect: d.
Explicație: În coordonate $V - T$, panta dreptelor duse prin origine este invers proporțională cu presiunea: $\frac{V}{T} = \frac{\nu R}{p}$. Așadar, orice două stări corespunzătoare unor puncte care se află pe aceeași dreaptă ce trece prin origine, vor avea aceeași presiune – în diagrama dată fiind vorba de punctele 3 și 6.



4. Într-un vas închis etanș cu un piston se află un gaz ideal, care suferă un proces izoterm, volumul scade de 2 ori. În acest proces, putem spune că:
a. volumul molar rămâne neschimbat; **b.** masa molară rămâne neschimbată; **c.** volumul molar crește de 2 ori; **d.** masa molară crește de 2 ori. **(3p)**
Răspuns corect: b.

Explicație: Dacă volumul scade de 2 ori, și volumul molar va scădea de 2 ori, conform relației $V_\mu = \frac{V}{\nu}$, atâta timp cât numărul de moli este constant (vasul e închis etanș). Constantă rămâne masa molară a gazului.

5. Trei cantități diferite din același gaz – cu mase m_1, m_2 și m_3 sunt supuse, separat la procese termodinamice, care sunt reprezentate în figură. În plus, se cunoaște că presiunea gazelor este mereu aceeași, indiferentă de gaz și de stare. Ce relație există, în aceste condiții, între cele trei mase de gaz?



a. $m_1 = m_2 = m_3$; **b.** $m_1 < m_2 < m_3$; **c.** $m_1 > m_2 > m_3$; **d.** $m_1 < m_2 > m_3$. **(3p)**

Răspuns corect: b.

Explicație: Din ecuația de stare $pV = \frac{m}{\mu}RT$, se poate exprima panta dreptelor care trec prin origine $\frac{V}{T} = \frac{mR}{\mu p}$. Cum presiunea și masa molară sunt aceleași, rezultă că masa gazului este direct proporțională cu panta dreptei, care la rândul crește odată cu unghiul care îl face dreapta cu axa orizontală. Așadar, cea mai înclinată dreaptă corespunde gazului cu masă mai mare - m_3, deci $m_1 < m_2 < m_3$.

II. Rezolvați următoarea problemă: (15 puncte)

Într-un cilindru cu piston, așezat în poziție orizontală se află o cantitate de hidrogen (cu masa molară $\mu = 2$ g/mol), considerat a fi gaz ideal. Inițial, acest gaz se află într-o stare 1, la temperatura $t_1 = 27$°C și o presiune egală cu presiunea atmosferică: $p_1 = p_o = 10^5$ Pa. Apoi, se blochează pistonul și se încălzește gazul, acesta ajungând în starea 2, caracterizată printr-o presiune crescută cu 20%. În final, pistonul se deblochează, iar gazul se încălzește până când volumul crește și el cu 20% (în starea 3).

a. Calculați masa unei molecule de hidrogen.
b. Calculați concentrația de molecule (numărul de molecule din unitatea de volum) în starea 1.
c. Determinați temperatura gazului în starea 2.
d. Determinați densitatea gazului în starea 3.

Rezolvare:

a. Masa unei molecule de hidrogen este dată de formula $m_o = \frac{\mu}{N_A}$, adică $m_o = \frac{2 \text{ g/mol}}{6{,}02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} \cong 0{,}33 \cdot 10^{-23} \text{ g} = 3{,}3 \cdot 10^{-25}$ kg.

b. Temperatura în Kelvini este $T_1 = (273 + 27)$ K $= 300$ K. În ecuația de stare pentru starea 1, $p_1 V_1 = \nu R T_1$, se poate înlocui numărul de moli cu $\nu = \frac{N}{N_A}$, rezultând $p_1 V_1 = \frac{N}{N_A} R T_1$, de unde concentrația de molecule se poate exprima ca $n = \frac{N}{V_1} = \frac{p_1 N_A}{R T_1}$, adică $n = \frac{10^5 \text{ Pa} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}}{8{,}31 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 300 \text{ K}} \cong \frac{6{,}02 \cdot 10^{28}}{2500} \frac{\text{molecule}}{\text{mol}} \cong 2{,}4 \cdot 10^{25} \frac{\text{molecule}}{\text{mol}}$.

c. Blocându-se pistonul, transformarea 1-2 se desfășoară la volum constant, fiind deci izocoră. Presiunea în starea 2 este $p_2 = p_1 + 20\% p_1 = 1{,}2 \cdot 10^5$ Pa. Legea transformării izocore este: $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$, de unde temperatura în starea 2 este: $T_2 = T_1 \frac{p_2}{p_1}$, adică $T_2 = 300 \text{ K} \cdot \frac{1{,}2 \cdot 10^5 \text{ Pa}}{10^5 \text{ Pa}} = 360$ K, sau $t_2 = (360 - 273)$°C $= 87$°C.

d. Deblocându-se pistonul, transformarea 2-3 este izobară. Volumul în starea 3 este $V_3 = V_2 + 20\% V_2 = 1{,}2 V_2$. Legea transformării izobare este: $\frac{V_2}{T_2} = \frac{V_3}{T_3}$, de unde temperatura în starea 3 este: $T_3 = T_2 \frac{V_3}{V_2}$, adică $T_3 = 360 \text{ K} \cdot 1{,}2 = 432$ K. Densitatea gazului se poate exprima din ecuația de stare, scrisă ca $p\mu = \rho R T$. Atunci, $\rho_3 = \frac{p_3 \mu}{R T_3}$, adică $\rho_3 = \frac{1{,}2 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}{8{,}31 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 432 \text{ K}} \cong \frac{240}{3600} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cong 0{,}067 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

III. Rezolvați următoarea problemă: (15 puncte)

O cantitate dată de gaz ideal aflată într-un cilindru cu piston își dublează presiunea într-o transformare notată cu 1-2, presiunea variind direct proporțional cu volumul gazului, după legea $p = aV$, unde $a = 2 \cdot 10^7\ \mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-5}$. Se cunoaște că, inițial, gazul ocupă un volum de 4 litri.

a. Exprimați dependența dintre temperatura absolută a gazului și presiunea sa, în transformarea 1-2.

b. Calculați de câte ori crește temperatura absolută a gazului (exprimată în Kelvini) în transformarea 1-2.

c. Dacă în continuare, pe o transformare 2-3, gazul se răcește izocor până la temperatura inițială (din starea 1), calculați presiunea în starea 3.

d. Reprezentați, în coordonate $p - V$ seria de transformări, 1-2-3.

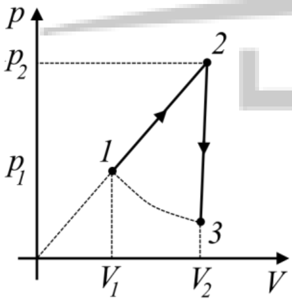
Rezolvare:

a. Ecuația $p = aV$ corespunde unei politrope de index -1. Putem înlocui volumul, din ecuația de stare $pV = \nu RT$ ca $V = \frac{\nu RT}{p}$. Atunci, legea transformării devine $p = a\frac{\nu RT}{p}$, sau $p^2 = a\nu RT$, de unde se poate exprima temperatura în funcție de presiune ca: $p^2 = bT$, unde b este o constantă.

b. Dacă presiunea se dublează în transformarea 1-2, atunci $p_2 = 2p_1$. Din ecuația transformării 1-2, se poate vedea că $\frac{p^2}{T} = b$ constant, deci $\frac{p_1^2}{T_1} = \frac{p_2^2}{T_2}$. Atunci $\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2^2}{p_1^2} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^2 = 2^2 = 4$, adică temperatura absolută crește de 4 ori.

c. Presiunea în starea 1 este $p_1 = aV_1$, adică $p_1 = 2 \cdot 10^7\ \mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^{-5} \cdot 4 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m}^3 = 8 \cdot 10^4\ \mathrm{Pa}$. Presiunea în starea 2 este, conform enunțului, $p_2 = 2p_1$, adică $p_2 = 1{,}6 \cdot 10^5\ \mathrm{Pa}$. Transformarea 2-3 fiind izocoră, se poate scrie legea $\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3}$. Atunci, $p_3 = p_2\frac{T_3}{T_2}$, dar cum $T_3 = T_1$, rezultă $p_3 = p_2\frac{T_1}{T_2}$, adică $p_3 = 1{,}6 \cdot 10^5\ \mathrm{Pa} \cdot \frac{1}{4} = 4 \cdot 10^4\ \mathrm{Pa}$.

d. Într-un grafic $p - V$, succesiunea de transformări se reprezintă:



Adresă poștală: Bd. Vasile Pârvan nr. 4, cod poștal 300223, Timișoara, jud. Timiș, România
Număr de telefon: +40-(0)256-592.697
Adresă de e-mail: edu@e-uvt.ro
Website: www.uvt.ro

Capitolul III – Principiul I al termodinamicii și aplicațiile sale

III.1. Căldura și lucrul mecanic

- Căldura este o mărime fizică de proces și se măsoară în S.I. în Jouli (reprezentând o variație de energie)
- Căldura schimbată de un corp (în general, nu neapărat un gaz) este dată de formula:

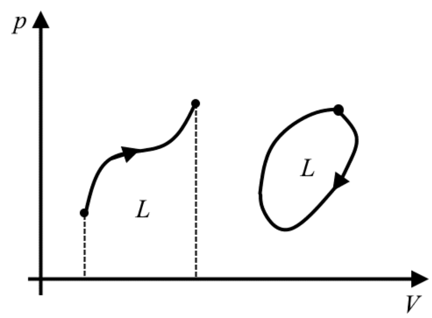
$$Q = C\Delta T = mc\Delta T$$

C este capacitatea sa calorică, $[C]_{\mathrm{SI}} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}}$, m este masa sa, c este căldura specifică, $[c]_{\mathrm{SI}} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg \cdot K}}$.

- Dacă avem două sau mai multe corpuri care schimbă doar căldură (absorb, $Q > 0$ sau cedează, $Q < 0$), este valabilă ecuația calorimetrică (de regulă se aplică la punerea în contact a lichidelor și solidelor):

$$Q_{ABS} = |Q_{CED}|$$

- Lucrul mecanic este o mărime fizică de proces și se măsoară în S.I. în Jouli (reprezentând o variație de energie)
- Pentru o transformare oarecare, lucrul mecanic reprezintă aria de sub grafic (doar în coordinate $p - V$).
- În coordonate $p - V$, lucrul mecanic este efectuat de gaz, dacă V crește (spunem în acest caz că gazul efectuează lucru mecanic, $L > 0$), și efectuat de exterior asupra gazului, dacă V scade (spunem în acest caz că gazul primește lucru mecanic, $L < 0$).



- În coordonate $p - V$ (și doar în aceste coordonate), pentru o transformare ciclică, lucrul mecanic este reprezentat de aria din interiorul graficului.
- Dacă transformarea ciclică e parcursă în sensul acelor de ceasornic, $L > 0$, iar în sens invers, $L < 0$.

III.2. Energia internă și principiul I

- Energia internă este o mărime fizică de stare și se măsoară în S.I. în Jouli. Variația de energie internă o notăm cu $\Delta U = U_2 - U_1$
- Pentru o transformare ciclică, variația energiei interne este nulă: $\Delta U = 0$.
- Pentru orice transformare termodinamică a unui gaz ideal, variația de energie internă se scrie ca:

$$\Delta U = \nu C_v \Delta T$$

și este valabil Principiul I al Termodinamicii (unde pentru semnul lucrului mecanic s-a folosit convenția lui Clausius – lucrul efectuat de sistem este pozitiv):

$$Q = \Delta U + L$$

III.3. Expresiile Q, L și ΔU pentru transformările simple ale gazului ideal

Transformare	Lucru Mecanic L	Căldură Q	Variație de Energie Internă ΔU
Izobară	$L = p\Delta V$	$Q = \nu C_p \Delta T$	$\Delta U = \nu C_v \Delta T$
Izocoră	$L = 0$	$Q = \nu C_v \Delta T$	$\Delta U = \nu C_v \Delta T$
Izotermă	$L = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \nu RT \ln \frac{p_1}{p_2}.$	$Q = L = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \nu RT \ln \frac{p_1}{p_2}$	$\Delta U = 0$
Adiabată	$L = -\Delta U = \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{\gamma - 1}$	$Q = 0$	$\Delta U = \nu C_v \Delta T$

unde: $\Delta T = T_2 - T_1$ și $\Delta V = V_2 - V_1$.

III.4. Exponenți adiabatici

- Exponentul adiabatic $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$ și căldurile molare la presiune constantă C_p și volum constant C_v (măsurate în $\mathrm{J/molK}$) sunt date de natura gazului ideal. Pentru temperaturi obișnuite:

gaz ideal	C_p	C_V	$\gamma = \frac{C_p}{C_V}$
monoatomic	$\frac{5}{2}R$	$\frac{3}{2}R$	$\frac{5}{3} \cong 1{,}67$
biatomic	$\frac{7}{2}R$	$\frac{5}{2}R$	$\frac{7}{5} = 1{,}4$
poliatomic	$4R$	$3R$	$\frac{4}{3} \cong 1{,}33$

între căldurile moare fiind valabilă ecuația Robert-Mayer:

$$C_p = C_v + R\,.$$

- La gazele reale, la temperaturi foarte mari sau foarte mici ale gazelor ideale, precum și amestecurile de gaze ideale la temperaturi obișnuite, mărimile pot avea și alte valori decât cele conform tabelului.

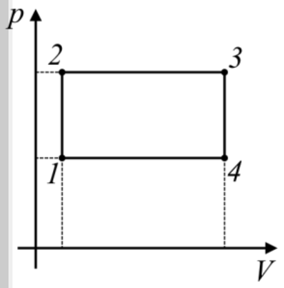
Test conținând noțiunile din capitolul III

Se consideră cunoscute: numărul lui Avogadro N_A = 6,02·10^{23} mol^{-1}, constanta gazelor ideale R = 8,31 J·mol^{-1}·K^{-1}. Între parametrii de stare ai gazului ideal într-o stare dată există relația: $pV=\nu RT$.

I. Pentru itemii 1-5 scrieți pe foaia de răspuns litera corespunzătoare răspunsului corect. (15 puncte)

1. Mărimea definită prin raportul $\frac{Q}{m\Delta T}$, unde Q, m și T sunt simboluri tipice utilizate în manualele de fizică, reprezintă:
a. căldura molară; **b.** căldura specifică; **c.** căldura molară; **d.** capacitate calorică. **(3p)**
Răspuns corect: b.
Explicație: $c = \frac{Q}{m\Delta T}$ reprezintă căldura specifică a unui material.

2. În diagrama alăturată, pe care din cele patru transformări lucrul mecanic schimbat de o cantitate de gaz are cea mai mare valoare (în valoare absolută)?



a. 1→2; **b.** 2→3; **c.** 3→4; **d.** 4→1. **(3p)**
Răspuns corect: a.
Explicație: Lucrul mecanic are interpretarea de aria de sub graficul unei transformări în coordonate p-V. Transformările 2→3 și 4→1 sunt izocore, neschimbându-se lucru mecanic cu exteriorul, iar lucrul schimbat pe transformarea 1→2 este mai mare decât cel schimbat (în valoare absolute) pe transformarea 3→4, aria mărginită de grafic și axa orizontală fiind vizual mai mare.

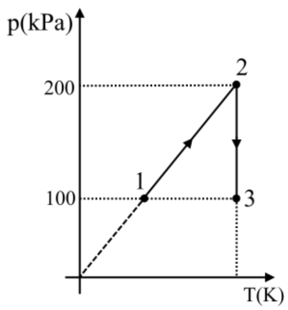
3. Pentru υ moli de gaz ideal biatomic (cu $C_p = 7/2R$), lucrul mecanic schimbat într-un proces adiabatic reversibil în care gazul se încălzește de la temperatura T_1 la T_2 este dat de expresia:
a. $2{,}5\upsilon R(T_2 - T_1)$ **b.** $2{,}5\upsilon R(T_1 - T_2)$ **c.** $3{,}5\upsilon R(T_1 - T_2)$ **d.** $\mathbf{3},5\upsilon R(T_2 - T_1)$ **(3p)**
Răspuns corect: b.
Explicație: Lucrul mecanic în transformarea adiabatică este dat de relația $L = -\Delta U = -\nu C_v \Delta T$. Cum $\Delta T = T_2 - T_1$ și din relația Robert-Mayer, $C_v = C_p - R$ rezultă $C_v = 5/2R = 2{,}5R$, expresia pentru lucrul mecanic schimbat este $L = 2{,}5\nu R(T_1 - T_2)$.

4. Pentru o transformare ciclică, variația energiei interne a unui mol de gaz ideal este:
a. întotdeauna pozitivă; **b.** întotdeauna negativă; **c.** întotdeauna nulă; **d.** poate fi fie pozitivă, fie negativă, fie nulă. **(3p)**
Răspuns corect: c.
Explicație: Variația de energie internă este $\Delta U = U_2 - U_1$. Dacă transformarea este ciclică, starea finală 2 este aceeași cu starea inițială 1, deci $U_2 = U_1$ și așadar $\Delta U = 0$.

5. Dacă o cantitate de gaz ideal se comprimă adiabatic, atunci gazul:
a. primește lucru mecanic și se răcește; **b.** cedează lucru mecanic și se răcește; **c.** primește lucru mecanic și se încălzește; **d.** primește lucru mecanic și se răcește. **(3p)**
Răspuns corect: c.
Explicație: Dacă gazul se comprimă, volumul scade, deci exteriorul efectuează lucru mecanic asupra sistemului, acesta fiind primit. Pentru o transformarea adiabatică, $L = -\Delta U = -\nu C_v \Delta T$, deci dacă lucrul mecanic este primit, $L < 0$, deci $\Delta T > 0$. Gazul se încălzește.

II. Rezolvați următoarea problemă: (15 puncte)

Doi moli de gaz ideal biatomic ($C_V = 5/2R$) se află inițial la temperatura $T_1 = 300$ K și se supun transformărilor, reprezentate în coordonate $p - T$ în figură. Considerați că $\ln 2 = 0{,}69$.



a. Reprezentați grafic succesiunea de transformări în coordonate $p - V$.

b. Calculați energia internă a gazului în starea 3.

c. Determinați lucrul mecanic schimbat de gaz cu mediul exterior, pe parcursul transformării 2-3.

d. Determinați căldura totală schimbată de gaz cu mediul exterior, pe întreaga transformare 1-2-3.

Rezolvare:

b. Energia internă în starea 3 este dată de relația: $U_3 = \nu R T_3$, unde $\nu = 2$ moli din enunț.

Pentru a găsi temperatura T_3, considerăm transformările: 1-2, care este o transformare izocoră: $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$, de unde rezultă că $T_2 = \frac{p_2}{p_1} T_1 = \frac{200\ \text{kPa}}{100\ \text{kPa}} T_1 = 2T_1 = 600$ K și 2-3, care este o transformare izotermă, deci $T_3 = T_2 = 2T_1$.

Atunci, energia internă are valoarea: $U_3 = 2\ \text{moli}\ \cdot 8{,}31\ \frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}} \cdot 600\ \text{K} = 9972\ \text{J}$.

c. Transformarea 2-3 este izotermă, deci lucrul mecanic are expresia $L_{23} = \nu R T_2 \ln \frac{p_1}{p_2}$. Cum $\ln \frac{p_1}{p_2} = \ln \frac{100\ \text{kPa}}{200\ \text{kP}} = \ln \frac{1}{2} = -\ln 2 = -0{,}69$, lucrul mecanic cerut are valoarea: $L_{23} = -2\ \text{moli} \cdot 8{,}31\ \frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}} \cdot 600\ \text{K} \cdot 0{,}69 \cong 6881\ \text{J}$.

d. Pe transformarea 1-2 (izocoră), căldura schimbată este dată de expresia $Q_{12} = \nu C_V (T_2 - T_1)$ și numeric: $Q_{12} = 2\ \text{moli}\ \cdot \frac{5}{2} \cdot 8{,}31\ \frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}} \cdot 300\ \text{K} = 12465\ \text{J}$. Pe transformarea 2-3 (izotermă), căldura schimbată este $Q_{23} = L_{23} = 6881\ \text{J}$. Așadar, căldura totală schimbată este $Q = Q_{12} + Q_{23} = 19346\ \text{J}$.

III. Rezolvați următoarea problemă: (15 puncte)

Un cilindru cu piston, așezat în poziție orizontală este închis la capăt cu ajutorul unui piston etanş, termoizolant şi mobil. În interiorul cilindrului se află o masă de $224\ \mathrm{g}$ de azot (cu masa molară $\mu = 28\ \mathrm{g/mol}$, $C_V = 5/2R$), considerat a fi gaz ideal, la temperatura $t_1 = 27°\mathrm{C}$ şi o presiune $p_1 = 5 \cdot 10^4$ Pa. Pistonul fiind inițial blocat, gazul se încălzeşte până ce presiunea devine cea atmosferică: $p_o = 10^5$ Pa. Apoi se deblochează pistonul și se continuă încălzirea gazului, până în momentul în care volumul se triplează.

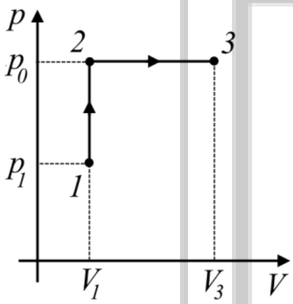
a. Reprezentați transformările suferite de gaz pe o diagramă în coordonate $p - V$.

b. Calculați variația energiei interne a gazului.

c. Determinați lucrul mecanic schimbat de gaz cu mediul exterior, pe parcursul întregului proces.

d. Determinați căldura absorbită de gaz.

Rezolvare:



b. Variația energiei interne a gazului este dată de: $\Delta U = \Delta U_{13} = \nu R(T_3 - T_1)$, unde $\nu = \frac{m}{\mu} = \frac{224\ \mathrm{g}}{28\ \mathrm{g/mol}} = 8$ moli.

Pentru a găsi temperatura T_3, considerăm transformările: 1-2, care este o transformare izocoră: $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$, de unde rezultă că $T_2 = \frac{p_2}{p_1} T_1 = \frac{p_o}{p_1} T_1 = \frac{10^5\ \mathrm{Pa}}{5 \cdot 10^4\ \mathrm{Pa}} T_1 = 2T_1 = 600$ K și 2-3, care este o transformare izobară: $\frac{V_2}{T_2} = \frac{V_3}{T_3}$, de unde rezultă $T_3 = \frac{V_3}{V_2} T_2 = 3 \cdot 2T_1 = 6T_1 = 1800$ K.

Atunci, variația energiei interne are valoarea: $\Delta U = 8 \text{ moli } \cdot \frac{5}{2} \cdot 8{,}31\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol \cdot K}} \cdot (1800\ \mathrm{K} - 300\ \mathrm{K}) = 249300\ \mathrm{J}$.

c. Transformarea 1-2 este izocoră, deci lucrul mecanic L_{12} este nul, deci tot lucrul mecanic se schimbă pe transformarea 2-3, izobară. Acesta are valoarea: $L = L_{23} = p_2(V_3 - V_2) = p_o(V_3 - V_1) = p_o \cdot 2V_1 = 4p_1V_1 = 4\nu RT_1 = 4 \cdot 8 \text{ moli } \cdot 8{,}31\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol \cdot K}} \cdot 300\ \mathrm{K} = 79776\ \mathrm{J}$.

d. Ținând cont de principiul I al termodinamicii, putem calcula căldura schimbată ca: $Q = \Delta U + L = 329076\ J$.

Capitolul IV – Motoare termice și principiul al II-lea al termodinamicii

IV.1. Randamentul motoarelor termice

- Un motor termic este un sistem care efectuează lucru mecanic pe baza căldurii (schimbate cu diferite surse), cu alte cuvinte transformând energia termică în energie mecanică.

- Un motor termic efectuează lucrul mecanic L pe baza căldurilor absorbite Q_{ABS} și cedate Q_{CED}, randamentul său fiind dat de:

$$\eta = \frac{L}{Q_{ABS}},$$

sau:

$$\eta = 1 - \frac{|Q_{CED}|}{Q_{ABS}},$$

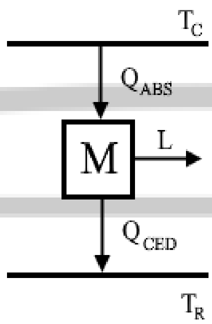
unde:

$$L = Q_{ABS} - |Q_{CED}|.$$

- Un motor termic ideal care funcționează între două surse de temperatură constantă T_R și T_C are randamentul dat de randamentul Carnot, și este maxim (pentru orice motor termic ce funcționează între temperaturile extreme respective):

$$\eta = 1 - \frac{T_R}{T_C},$$

unde temperatura sursei reci T_R, respectiv a sursei calde T_C se exprimă în Kelvini!



IV.2. Principiul al II-lea al termodinamicii

Principiul al II-lea al termodinamicii are mai multe formulări.

- Formularea Clausius

Enunț: Este imposibil de realizat o transformare al cărei unic rezultat final să fie o transmitere a căldurii de la un corp cu temperatură dată la un altul cu o temperatură mai ridicată.
Consecință: Căldura nu se poate transfera spontan de la un corp cu temperatura mai mare la unul cu temperatura mai mică.

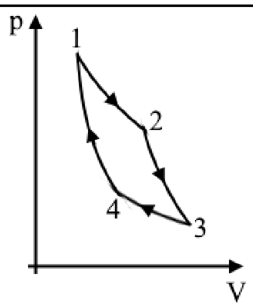
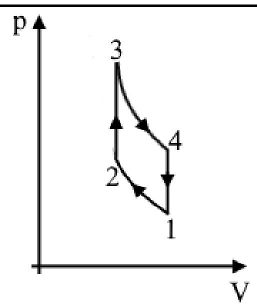
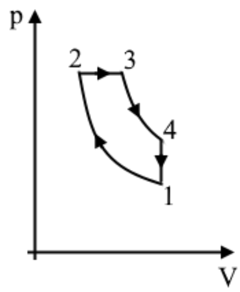
- Formularea Kelvin

Enunț: Este imposibil de realizat o transformare ciclică al cărei unic rezultat final să fie o transformare în lucru mecanic a căldurii luate de la o sursă de temperatură uniformă.
Consecință: Chiar dacă lucrul mecanic se poate transforma integral în căldură, căldura nu se poate transforma integral în lucru mecanic, dacă dispozitivul cu care se realizează această conversie funcționează ciclic.

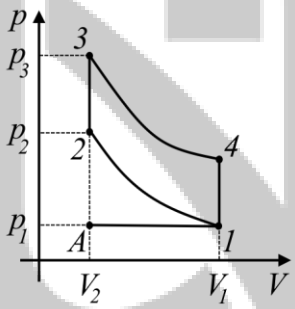
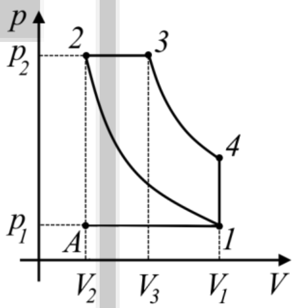
- Formularea Carnot

Enunț: Randamentul unei mașini termice reversibile depinde numai de temperatura sursei calde și a sursei reci și nu depinde de natura substanței de lucru.
Consecință: Randamentul unei mașini termice ireversibile este întotdeauna mai mic decât randamentul unei mașini termice care funcționează reversibil între aceleași limite de temperatură. Așadar, randamentul unui ciclu (motor) oarecare este mai mic decât randamentul unui ciclu Carnot care funcționează între temperaturile extreme ale ciclului respectiv.

IV.3. Cicluri termodinamice uzuale

Ciclul Carnot	**Ciclul Otto**	**Ciclul Diesel**
două adiabate și două izoterme	două adiabate și două izocore	două adiabate, o izobară și o izocoră
		

IV.4. Caracteristicile motoarelor Otto și Diesel

	Motorul Otto	**Motorul Diesel**
Tip de motor:	Motor cu Aprindere prin Scânteie	Motor cu Aprindere prin Compresie
Caracteristici:	aspiră un amestec de benzină și aer, îl comprimă și îl aprinde cu o scânteie electric (prin intermediul bujiei)	aspiră aer, îl comprimă și apoi este injectată motorina care se aprinde.
	folosește un carburator unde este amestecată benzina cu aerul, sau o pompă de injecție (carburantul nu este injectat direct în cilindru).	folosește injecție directă, în care combustibilul este injectat direct în cilindru
	Motorul Otto	**Motorul Diesel**
Bazat pe ciclul:	Ciclul Otto	Ciclul Diesel
		
Timpul 1	**Aspirația** A→1: aspirație izobară	**Aspirația** A→1: aspirație izobară
Timpul 2	**Compresia** 1→2: compresia adiabatică	**Compresia** 1→2: compresia adiabatică
Timpul 3:	**Aprinderea/ Arderea și Detenta** 2→3: aprindere izocoră 3→4: detentă adiabatică (timpul motor)	**Arderea și Detenta** 2→3: ardere izobară 3→4: detentă adiabatică (timpul motor)
Timpul 4:	**Evacuarea** 4→1: izocoră 1→A: evacuare izobară	**Evacuarea** 4→1: izocoră 1→A: evacuare izobară

Test conținând noțiunile din capitolul IV

Se consideră cunoscute: numărul lui Avogadro $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ mol^{-1}, constanta gazelor ideale $R = 8{,}31$ J·mol^{-1}·K^{-1}. Între parametrii de stare ai gazului ideal într-o stare dată există relația: $pV=\nu RT$.

I. Pentru itemii 1-5 scrieți pe foaia de răspuns litera corespunzătoare răspunsului corect. (15 puncte)

1. Un motor termic reprezintă un sistem termodinamic cu funcționare ciclică:
a. ce realizează transformarea integrală a energiei mecanice în energie termică; **b.** ce realizează transformarea integrală a energiei termice în energie mecanică; **c.** ce realizează transformarea parțială a energiei termice în energie mecanică; **d.** ce realizează transformarea parțială a energiei mecanice în energie termică. **(3p)**

Răspuns corect: d.

Explicație: Un motor termic transformă energie termică în energie mecanică, dar, datorită principiului al II-lea al termodinamicii, transformarea nu este integrală, ci doar parțială.

2. În funcționarea unui motor termic, raportul dintre lucrul mecanic efectuat și modulul căldurii cedate este 3/7. Care este raportul dintre căldura primită și cea modului celei cedate?
a. 3/10; **b.** 7/10; **c.** 10/7; **d.** 10/3. **(3p)**

Răspuns corect: d.

Explicație: Dacă motorul cedează 3 părți din căldura primită, iar alte 7 le convertește în lucru mecanic, înseamnă că absoarbe 10 părți de la sursa caldă. Așadar, raportul dintre căldura primită și cea cedată, în modul, este 10/3.

3. Randamentul unui motor termic este $\eta = 0{,}2$. Dacă motorul cedează sursei reci 400 J, care este cantitatea de căldură absorbită?
a. 80 J **b.** 320 J **c.** 480 J **d.** 500 J **(3p)**

Răspuns corect: b.

Explicație: Randamentul motorului este dat de relația $\eta = 1 - \frac{|Q_{CED}|}{Q_{ABS}}$. Atunci $\frac{|Q_{CED}|}{Q_{ABS}} = 1 - \eta$, deci $Q_{ABS} = \frac{|Q_{CED}|}{1-\eta}$. Cum $|Q_{CED}| = 400$ J și $\eta = 0{,}2$, rezultă $Q_{ABS} = 500$ J.

4. La un motor care funcționează după ciclul Otto, se efectuează lucru mecanic asupra substanței de lucru în timpul:
a. admisiei; **b.** arderii și detentei; **c.** compresiei; **d.** evacuării. **(3p)**

Răspuns corect: c.

Explicație: Lucru mecanic se efectuează asupra substanței de lucru în timpul compresiei adiabatice.

5. La un motor Diesel, timpul motor cuprinde:
a. aspirația; **b.** detenta; **c.** compresia; **d.** evacuarea. **(3p)**

Răspuns corect: b.

Explicație: Detenta face parte din timpul motor al unui motor Diesel.

II. Rezolvați următoarea problemă: (15 puncte)

Un motor termic funcționează după ciclul Diesel. Se știe că energia internă în timpul detentei (transformarea 3-4) scade cu 1000 kJ, iar pe transformarea 2-3 căldura absorbită este e 250 kJ și lucrul efectuat pe aceeași transformare 100 kJ, iar căldura cedată pe transformările unde se cedează căldură către exterior este de 100 kJ în valoare absolută.

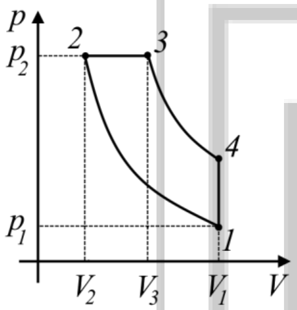
a. Reprezentați grafic ciclul după care funcționează motorul termic, în coordonate $p - V$.

b. Calculați valorile variației energiei interne pe transformările 2-3 și 1-2.

c. Determinați valorile lucrului mecanic schimbat cu exteriorul în transformările 3-4 și 1-2.

d. Determinați randamentul motorului.

Rezolvare:



a.

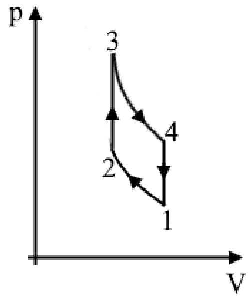
b. Din enunț știm că $Q_{23} = 250\,J$ și $L_{23} = 100\,J$, deci din principiul I al termodinamicii $\Delta U_{23} = Q_{23} - L_{23} = 250\,\mathrm{J} - 100\,\mathrm{J} = 150\,J$. De asemenea, din enunț știm că $Q_{41} = -100\,J$, iar cum transformarea este izocoră ($L_{41} = 0\,J$), rezultă că $\Delta U_{41} = Q_{41} = -100\,J$. Tot din enunț reiese că $\Delta U_{34} = -1000\,J$. Cum pe întreg ciclul termodinamic, $\Delta U = \Delta U_{12} + \Delta U_{23} + \Delta U_{34} + \Delta U_{41} = 0$, rezultă $\Delta U_{12} = -\Delta U_{23} - \Delta U_{34} - \Delta U_{41} = -\,150\,J + 1000\,J + 100\,J = 950\,J$.

c. Pe transformarea 3-4 $\Delta U_{34} = -1000\,J$, iar cum transformarea este adiabatică ($Q_{34} = 0\,J$), rezultă $L_{34} = -\Delta U_{34} = 1000\,J$. Analog, pe transformarea 1-2 $\Delta U_{12} = 950\,J$, și cum transformarea este tot adiabatică ($Q_{12} = 0\,J$), rezultă $L_{12} = -\Delta U_{12} = -950\,J$.

d. Randamentul motorului termic se calculează ca $\eta = 1 - \frac{|Q_{CED}|}{Q_{ABS}}$. $Q_{CED} = Q_{41} = -100\,J$, iar $Q_{ABS} = Q_{23} = 150\,J$. Atunci $\eta = 1 - \frac{|-100\,J|}{250\,J} = \frac{250\,J - 100\,J}{250\,J} = \frac{150\,J}{250\,J} = \frac{3}{5} = 60\%$.

III. Rezolvați următoarea problemă: (15 puncte)

Funcționarea unui motor Otto are la bază procesul ciclic reprezentat în figura alăturată. Se ştie că gazul are căldura molară la volum constant $C_V = 2{,}5R$ și pe parcursul ciclului, parametri în diferite stări au valorile: $p_1 = 10^5$ Pa, $V_1 = 10$ litri, $T_1 = 300$ K, $T_2 = 1{,}2T_1$ şi $T_3 = 5{,}2T_1$.



a. Determinați energia internă a gazului în starea 1.
b. Calculați valoarea lucrului mecanic schimbat de gaz cu exteriorul pe parcursul comprimării adiabatice.
c. Calculați valoarea căldurii absorbite de gaz pe parcursul unui ciclu.
d. Determinați randamentul ciclului Otto.

Rezolvare:

a. Energia internă în starea 1 are expresia $U_1 = \nu C_V T_1 = 2{,}5\nu R T_1$. Cum ecuația de stare pentru starea 1 este $p_1 V_1 = \nu R T_1$, rezultă că putem scrie $U_1 = 2{,}5 p_1 V_1$, adică $U_1 = 2{,}5 \cdot 10^5\ \text{Pa} \cdot 10^{-2}\ \text{m}^3 = 2{,}5 \cdot 10^3\ \text{J} = 2500\ \text{J}$.

b. Comprimarea adiabatică este transformarea 1-2 din grafic. Lucrul mecanic pe această transformare se poate scrie, ținând cont că nu se schimbă căldură, ca $L_{12} = \Delta U_{12} = U_2 - U_1$. Energia internă în starea 1 are expresia $U_1 = \nu C_V T_2 = 2{,}5\nu C_V \cdot 1{,}2T_1 = 1{,}2U_1$. Atunci, $L_{12} = 0{,}2U_1 = 0{,}2 \cdot 2500\ \text{J} = 500\ \text{J}$.

c. Căldură se absoarbe doar pe transformarea 2-3 a gazului. Expresia căldurii pe această transformare izocoră este $Q_{23} = \nu C_V (T_3 - T_2)$, deci căldura absorbită va fi $Q_{ABS} = \nu C_V (5{,}2T_1 - 1{,}2T_1) = 4\nu C_V T_1 = 4U_1 = 10000\ \text{J}$.

d. Pentru a calcula randamentul, se va calcula întâi căldura cedată pe ciclu. Pentru aceasta, este nevoie de determinarea temperaturii T_4. Transformările 1-2 și 3-4 sunt adiabate, legile corespunzătoare acestora, în coordonate $T - V$ se scriu: $T_1 V_1^\gamma = T_2 V_2^\gamma$ și $T_3 V_3^\gamma = T_4 V_4^\gamma$. Înmulțindu-le membru cu membru, se obține egalitatea $T_1 T_3 V_1^\gamma V_3^\gamma = T_2 T_4 V_2^\gamma V_4^\gamma$. Cum $V_1 = V_4$ și $V_2 = V_3$, factorii cu volume se simplifică de pe ambele părți ale egalității, ce devine $T_1 T_3 = T_2 T_4$, de unde $T_4 = \frac{T_1 T_3}{T_2}$, adică $T_4 = \frac{T_1 \cdot 5{,}2T_1}{1{,}2T_1} = \frac{52}{12} T_1 = \frac{13}{3} T_1$. Expresia căldurii transformarea izocoră 4-1 este $Q_{41} = \nu C_V (T_1 - T_4)$, deci căldura cedată va fi $Q_{CED} = \nu C_V \left(T_1 - \frac{13}{3} T_1\right) = -\frac{10}{3} \nu C_V T_1 = -\frac{10}{3} U_1$. Randamentul ciclului este $\eta = 1 - \frac{|Q_{CED}|}{Q_{ABS}}$, adică $\eta = 1 - \frac{\left|-\frac{10}{3} U_1\right|}{4U_1} = 1 - \frac{10}{12} = \frac{1}{6} \cong 0{,}167 = 16{,}7\%$.