Costin-Ionuț DOBROTĂ

PROBLEME DE TERMODINAMICĂ

pentru CLASA a X-a

NOȚIUNI TEORETICE

SISTEMUL INTERNAȚIONAL DE MĂRIMI ȘI UNITĂȚI

Mărimi fizice și unități de măsură fundamentale în SI

Nr. crt.	Mărime fizică fundamentală	Unitate de măsură	Simbol
1	Lungime: l, L, h, x, …	metru	m
2	Timp: t, T, τ	secundă	s
3	Masă: m, M	kilogram	kg
4	Cantitatea de substanță: ν	mol	mol
5	Temperatura termodinamică: T	Kelvin	K
6	Intensitatea curentului electric: I	Amper	A
7	Intensitatea luminoasă: I_v	candela	cd

Observație: Prin excepție, masa se măsoară în kg și nu în g, așadar gramul este submultiplu al kilogramului, și nu invers $\left(1\,\text{g}=10^{-3}\,\text{kg}\right)$. În termodinamică, pentru a corela unitățile de măsură ale masei și cantității de substanță, se exprimă masa în **kg**, iar cantitatea de substanță ***se poate*** exprima în **kmol**.

Mărimi fizice și unități de măsură derivate din unități fundamentale ale SI (exemple)

Mărime fizică: simbol	Unitatea de măsură în SI	Unitatea de măsură exprimată în unități fundamentale ale SI
Unghiul: α	rad – radian	$\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ (adimensional)
Arie: A, S		m^2
Volum: V		m^3
Viteză: v		m/s
Accelerație: a		m/s^2
Densitate: ρ		kg/m^3
Forță: F	Newton: N	$\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
Presiune: p	Pascal: $\text{Pa}=\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$
Lucrul mecanic, energia, căldura: L, E, W, Q	Joule: $\text{J}=\text{N}\cdot\text{m}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$
Puterea: P	Watt: $\text{W}=\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$

Unități de măsură tolerate (non-SI)

Nr. crt.	**Mărime fizică**	**Unitatea de măsură tolerată**	**Unitatea de măsură exprimată în unități ale SI**
1	Distanță	Ångstrom	$1Å = 10^{-10}$ m
		an – lumină	1an–lumină $= 3\cdot10^{8}$ (m/s)$\cdot365{,}25\cdot24\cdot3600$ s $= 9{,}4607304725808\cdot10^{15}$ m
2	Timp, durată	minutul	1min. = 60 s
		ora	1h = 60 min. = 3600 s
3	Masă	unitatea atomică de masă	**$1u = 1{,}66053904\cdot10^{-27}$ kg**
		tona	$1t = 10^{3}$ kg
4	Arie	hectarul	$1ha = 10^{4}$ m^2
5	Volum	litrul	**$1L = 10^{-3}$ m^3**
6	Energie, căldură	kilowatt-ora	1kWh = 3 600 000 J
		calorie	**1cal = 4,185 J**
7	Putere	cal putere	1CP = 735,49 W ≈ 736 W
8	Presiune	Atmosfera, barul	**1atm = 101.325 Pa ≈ 10^5 Pa** **1 bar = 10^5 Pa**
		milimetru coloană de mercur	**1mmHg ≈ 1torr = 1/760 atm ≈ 133,3 Pa**
10	Temperatură	grad Celsius	**T (K) = t (°C) +273,15**
		grad Fahrenheit	**t (°F) = (9/5)·t (°C) +32**

Submultiplii și multiplii unităților de măsură în SI

Denumire	**Simbol**	**Factor de multiplicare**
pico	**p–**	**10^{-12}**
nano	**n–**	**10^{-9}**
micro	**µ–**	**10^{-6}**
mili	**m–**	**10^{-3}**
centi	**c–**	**10^{-2}**
deci	**d–**	**10^{-1}**
deca	**da–**	**10^{1}**
hecto	**h–**	**10^{2}**
kilo	**k–**	**10^{3}**
mega	**M–**	**10^{6}**
giga	**G–**	**10^{9}**
tera	**T–**	**10^{12}**

NOȚIUNI ELEMENTARE DE CALCUL MATEMATIC

Exponenți

x^n semnifică x înmulțit cu el însuși de n ori, unde x se numește *baza* iar n este *exponentul* (de exemplu: $5^3 = 5 \cdot 5 \cdot 5 = 125$). Dacă $n = 2$, x^2 se citește „x pătrat", iar dacă $n = 3$, x^3 se citește „x cub" (exemple: m^2 se citește „metru pătrat", iar m^3 se citește „metru cub"). Dacă $n = 1/2$, $x^{1/2} = \sqrt{x}$ se citește „rădăcina pătrată a lui x", iar dacă $n = 1/3$, $x^{1/3} = \sqrt[3]{x}$ se citește „rădăcina cubică a lui x".

Reguli de calcul cu puteri

- $x^1 = x,\ \ x^0 = 1,\ \ x^{-1} = \dfrac{1}{x},\ \ x^{-n} = \dfrac{1}{x^n},$
- $\sqrt{x} = x^{\frac{1}{2}},\ \ \sqrt[n]{x} = x^{\frac{1}{n}},$
- Produsul a două puteri: $x^m \cdot x^n = x^{m+n},\ \ (x \cdot y)^n = x^n \cdot y^n$,
- Raportul a două puteri: $\dfrac{x^m}{x^n} = x^{m-n},\ \ \dfrac{x^n}{y^n} = \left(\dfrac{x}{y}\right)^n,$
- Puterea unei puteri: $(x^m)^n = x^{m \cdot n}$.

Notația științifică și puterile lui 10

În fizică, se întâlnesc frecvent valori numerice exprimate prin numere foarte mari sau foarte mici care se scriu folosind ***notația științifică*** sub forma unui număr zecimal cu o cifră în stânga separatorului zecimal (virgula), multiplicat cu o putere a lui 10: $a \cdot 10^b$.

Exemple:

- Unitatea atomică de masă: $1\text{u} = 1,66053904 \cdot 10^{-37}\,\text{kg} \simeq 1,66 \cdot 10^{-27}\,\text{kg}$;
- Masa electronului: $m_e = 9,10938291 \cdot 10^{-31}\,\text{kg} \simeq 9,1 \cdot 10^{-31}\,\text{kg}$;
- Numărul lui Avogadro: $N_A = 6,02214129 \cdot 10^{23}\,\text{mol}^{-1} \simeq 6,022 \cdot 10^{23}\,\text{mol}^{-1}$;
- Sarcina electrică elementară: $e = 1,602176565 \cdot 10^{-19}\,\text{C} \simeq 1,6 \cdot 10^{-19}\,\text{C}$.

Operații matematice cu puterile lui 10

Considerăm următoarele numere în notație științifică: $a\cdot10^m$, $b\cdot10^n$ și $c\cdot10^n$.

- $\left(a\cdot10^m\right)\cdot\left(b\cdot10^n\right)=a\cdot b\cdot10^{m+n}$,

  Exemplu: $\left(2{,}31\cdot10^5\right)\cdot\left(3{,}12\cdot10^{-16}\right)=7{,}21\cdot10^{-11}$,

- $\dfrac{a\cdot10^m}{b\cdot10^n}=\dfrac{a}{b}\cdot10^{m-n}$,

  Exemplu: $\dfrac{3{,}6\cdot10^{12}}{7{,}2\cdot10^{-2}}=0{,}5\cdot10^{14}=5\cdot10^{13}$,

- $b\cdot10^n+c\cdot10^n=\left(b+c\right)\cdot10^n$,

  Exemplu: $2{,}4\cdot10^5+3{,}1\cdot10^6=\left(0{,}24+3{,}1\right)\cdot10^6=3{,}34\cdot10^6$,

- $b\cdot10^n-c\cdot10^n=\left(b-c\right)\cdot10^n$,

  Exemplu: $2{,}4\cdot10^5-3{,}8\cdot10^5=\left(2{,}4-3{,}8\right)\cdot10^5=-1{,}4\cdot10^5$.

Observație: În limbaje de programare (C++, Fortran, etc.) și în aplicații (Excel, Access, etc.) notația științifică $a\cdot10^b$ se scrie în forma „*a*E*b*" sau „*a*e*b*". De exemplu, $6{,}02\cdot10^{23}$ se scrie în forma 6,02e23, iar $1{,}38\cdot10^{-23}$ se scrie în forma 1,38e–23.

Variații, variații relative, rapoarte exprimate în procente

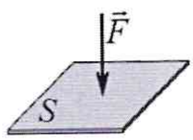
Fenomenele fizice sunt procese care se desfăşoară în timp şi implică variații (continue sau discrete) ale unor mărimilor fizice denumite uneori parametri sau variabile. Faptul că o mărime fizică variază înseamnă că valoarea acesteia se modifică: creşte sau scade (de regulă odată cu trecerea timpului). În rezolvarea problemelor este important să punem în relații matematice informațiile referitoare la variații ale mărimilor fizice. Astfel, în cazul unei mărimi fizice notate x, dacă notăm cu x_i – valoarea inițială a mărimii fizice şi cu x_f – valoarea finală a acesteia, putem întâlni următoarele exprimări:

Textul	Relația matematică	Observații	Exemple
Variația mărimii fizice x	$\Delta x = x_f - x_i$		„variația temperaturii este 20 K": $\Delta T = 20\,\mathrm{K}$
x creşte de n ori	$x_f = n \cdot x_i$		„viteza creşte de 3 ori": $v = 3v_0$
x scade de n ori	$x_f = \frac{x_i}{n}$		„înălțimea scade de 5 ori": $h = \frac{h_0}{5}$
x creşte cu o cantitate x_0	$x_f = x_i + x_0$	$x_0 = \Delta x$	„presiunea creşte cu 0,2 atm": $p_2 = p_1 + \Delta p,\ \Delta p = 0{,}2\,\mathrm{atm}.$
x scade cu o cantitate x_0	$x_f = x_i - x_0$	$x_0 = -\Delta x$	„presiunea scade cu 0,4 atm": $p_2 = p_1 + \Delta p,\ \Delta p = -0{,}4\,\mathrm{atm}.$
x creşte cu $n\%$ (creştere procentuală)	$x_f = x_i + \frac{n}{100} x_i$	$n\% = \frac{n}{100}$	„volumul creşte cu 25%": $V_2 = V_1 + \frac{25}{100} V_1$
x scade cu $n\%$ (descreştere procentuală)	$x_f = x_i - \frac{n}{100} x_i$	$n\% = \frac{n}{100}$	„energia cinetică scade cu 60%": $E_{c2} = E_{c1} - \frac{60}{100} E_{c1}$
Variația relativă a lui x este variația lui x raportată la valoarea inițială	$\frac{\Delta x}{x_i} = \frac{x_f - x_i}{x_i}$	Se exprimă în procente	„variația relativă a lungimii (alungirea relativă) este 20%": $\frac{\Delta l}{l_0} = 20\% \Leftrightarrow \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{20}{100}$
Viteza de variație (în timp) a lui x	$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_f - x_i}{t_f - t_i}$	Rata de creştere sau de scădere	„viteza de variație a temperaturii este 8 K/s": $\frac{\Delta T}{\Delta t} = 8\frac{\mathrm{K}}{\mathrm{s}}$

PRESIUNEA

Definiția presiunii

Presiunea este mărime fizică scalară egală cu raportul dintre mărimea forței care apasă normal și uniform o suprafață și aria acestei suprafețe.

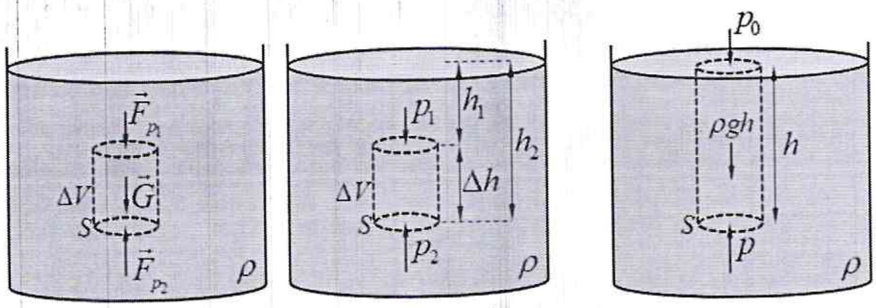


Presiunea: $p = \frac{F}{S}$, $[p]_{SI} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2} = \mathrm{Pa}$ (Pascal).

Presiunea hidrostatică. Principiul fundamental al hidrostaticii

Presiunea hidrostatică este presiunea exercitată la un nivel (adâncime) într-un lichid aflat în echilibru, datorându-se greutății pe care o exercită lichidul aflat deasupra nivelului respectiv. Presiunea hidrostatică este direct proporțională cu adâncimea la care este măsurată.

În figura alăturată **(a,b)** delimităm un volum cilindric ΔV într-un lichid aflat în echilibru, volum cu aria bazei S și cu înălțimea Δh. Asupra volumului de lichid acționează forțele de presiune $F_{p1} = p_1 S$, $F_{p2} = p_2 S$ și greutatea $G = mg = \rho \Delta V g = \rho S \Delta h g$.



(a) **(b)** **(c)**

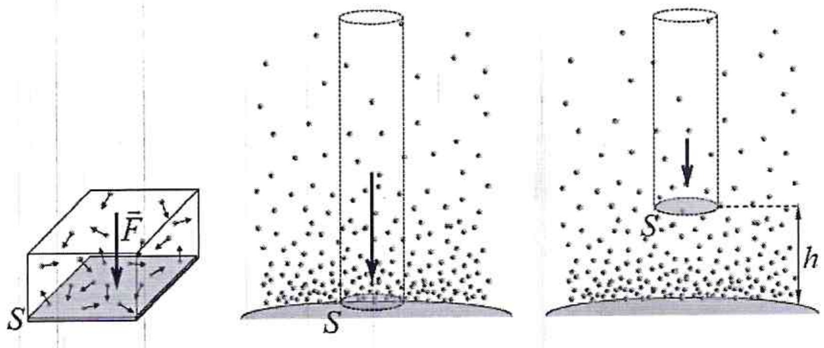
Din condiția de echilibru, $\vec{F}_{p2} + \vec{F}_{p1} + \vec{G} = 0$, obținem $F_{p2} = F_{p1} + G \Rightarrow$ $p_2 - p_1 = \rho g \Delta h$, relație numită *principiul fundamental al hidrostaticii*: *diferența de presiune între două puncte dintr-un lichid în echilibru este egală cu presiunea hidrostatică exercitată de o coloană de lichid având ca înălțime distanța dintre planele care conțin punctele respective.*

Dacă cele două puncte se află la aceeași adâncime, $\Delta h = 0$, obținem $p_2 = p_1$, deci *presiunea este aceeași în toate punctele aflate la aceeași adâncime în lichidul aflat în echilibru în câmp gravitațional.*

Dacă aplicăm principiul fundamental al hidrostaticii în cazul prezentat în figura **(c)**, obținem $p = p_0 + \rho g h$, unde p_0 este presiunea atmosferică.

Presiunea atmosferică. Determinarea presiunii atmosferice

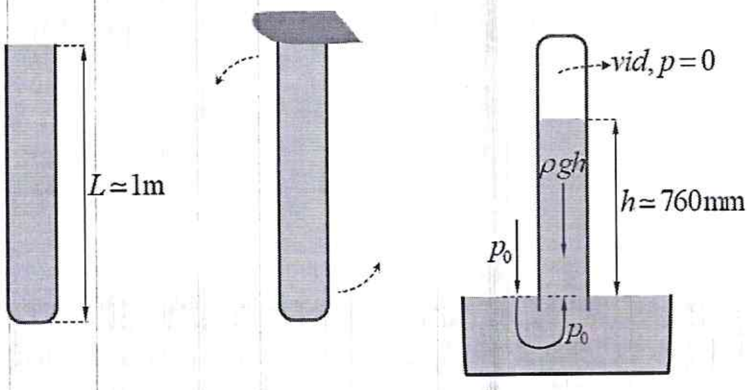
Presiunea unui gaz închis într-o incintă este presiunea exercitată asupra pereților incintei, datorată forțelor de impact cauzate de ciocnirile moleculelor cu pereții incintei, așa cum observăm în figura **(a)**.



(a) (b) (c)

Presiunea atmosferică, notată p_0, este presiunea exercitată de aerul atmosferic și poate fi aproximată, la un anumit nivel (înălțime), cu presiunea hidrostatică datorată greutății aerului atmosferic aflat deasupra acelui nivel. În figura **(b)** am delimitat o coloană de aer din atmosfera terestră care determină presiunea atmosferică la nivelul suprafeței Pământului, iar în figura **(c)** am delimitat o coloană de aer din atmosfera terestră care determină presiunea atnosferică la înălțimea h față de suprafeței Pământului. Presiunea atmosferică scade cu înălțimea deoarece scade numărul de molecule de aer conținute în volumul delimitat.

În figura următoare este prezentat *experimentul lui Torricelli* pentru determinarea presiunii atmosferice. Se folosește un tub cu lungimea de aproximativ un metru, închis la un capăt, numit *tub barometric* sau *tubul lui Torricelli*.



(a) (b) (c)

Tubul barometric se umple cu mercur (cu densitatea $\rho = 13600\,\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$), apoi se astupă cu degetul, se rotește cu 180° și se introduce într-un vas cu mercur. După eliberarea capătului deschis, o parte din mercurul din tub coboară în vas, iar în tub rămâne o coloană de mercur cu înălțimea de aproximativ $760\,\mathrm{mm}$, măsurată față de suprafața liberă a mercurului din vas. În figura **(c)** observăm că în tub, deasupra coloanei de mercur este vid ($p = 0$), iar această porțiune a tubului se numește cameră barometrică.

Dacă aplicăm principiul fundamental al hidrostaticii pentru coloana de mercur din tubul barometric, $p_0 - p = \rho gh$, unde $p = 0$, obținem presiunea atmosferică $p_0 = \rho gh$, deci presiunea atmosferică este egală cu presiunea hidrostatică a coloanei de mercur din tub.

Un calcul aproximativ conduce la:

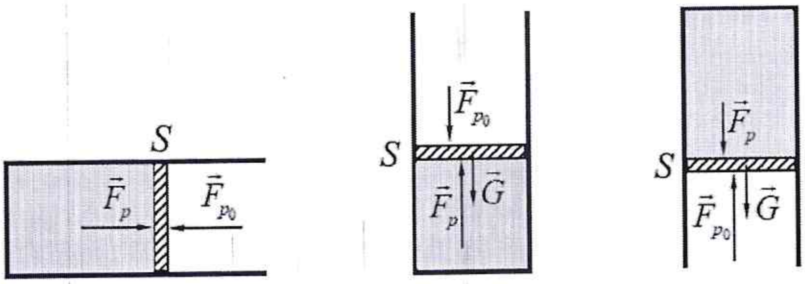
$$p_0 = \rho gh = 13600\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\times 9,81\frac{\text{N}}{\text{kg}}\times 0,76\,\text{m} \simeq 1,01\cdot 10^5\,\frac{\text{N}}{\text{m}^2}.$$

Presiunea atmosferică normală se consideră, prin convenție, $p_0 = 1,01325\cdot 10^5\,\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$.

O unitate de măsură a presiunii este *torrul.* 1 torr reprezintă presiunea datorată greutății unei coloane de mercur cu înălțimea de 1 mm, deci $1\,\text{torr} = 1\,\text{mm Hg} \simeq 133,3\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$, iar presiunea atmosferică normală, exprimată în torri (milimetri coloană de mercur) este $p_0 = 760\,\text{torr}$.

Presiunea gazelor închise în cilindru cu piston

Considerăm un gaz închis într-un cilindru cu piston care se poate deplasa fără frecări. În figura următoare sunt prezentate stări ale gazului în care pistonul este în echilibru mecanic (în repaus), deci forța rezultantă care acționează asupra pistonului este nulă.



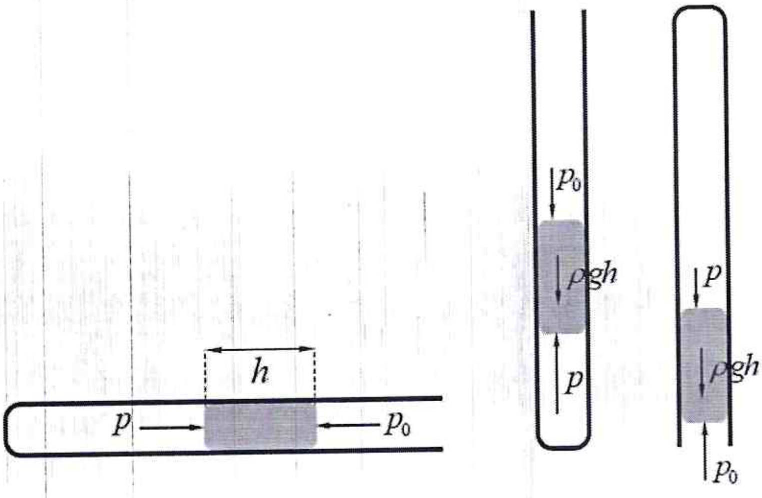
(a) **(b)** **(c)**

- Starea **(a)**: $\vec{F}_p + \vec{F}_{p0} = 0 \Rightarrow F_p = F_{p0} \Rightarrow pS = p_0 S \Rightarrow p = p_0$, presiunea gazului este egală cu presiunea atmosferică.
- Starea **(b)**: $\vec{F}_p + \vec{F}_{p0} + \vec{G} = 0 \Rightarrow F_p = F_{p0} + G \Rightarrow pS = p_0 S + Mg \Rightarrow$ $p = p_0 + \frac{Mg}{S}$, presiunea gazului este mai mare decât presiunea atmosferică.

- Starea **(c)**: $\vec{F}_p + \vec{F}_{p0} + \vec{G} = 0 \Rightarrow \quad F_{p0} = F_p + G \Rightarrow \quad p_0 S = pS + Mg \Rightarrow$
  $p = p_0 - \dfrac{Mg}{S}$, presiunea gazului este mai mică decât presiunea atmosferică.

Presiunea gazelor închise în tuburi cu coloană de lichid

Considerăm un gaz închis într-un tub subțire cu ajutorul unei coloane de mercur cu lungimea h. În figura următoare sunt prezentate stări ale gazului în care coloana de mercur este în echilibru mecanic (în repaus), deci forța rezultantă care acționează asupra acesteia este nulă. Din echilibrul forțelor rezultă principiul fundamental al hidrostaticii, pe care îl vom aplica în cele trei stări prezentate în figura următoare.



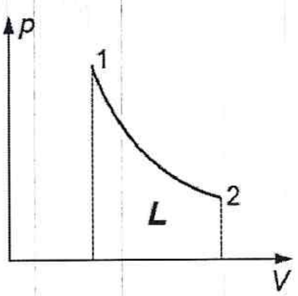
(a) (b) (c)

- Starea **(a)**: $p = p_0$, presiunea gazului este egală cu presiunea atmosferică.
- Starea **(b)**: $p - p_0 = \rho g h \Rightarrow \quad p = p_0 + \rho g h$, presiunea gazului este mai mare decât presiunea atmosferică.
- Starea **(c)**: $p_0 - p = \rho g h \Rightarrow \quad p = p_0 - \rho g h$, presiunea gazului este mai mică decât presiunea atmosferică.

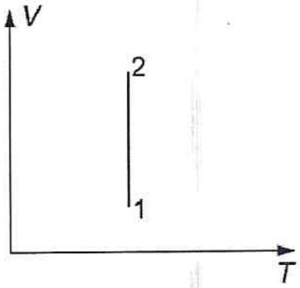
REPREZENTĂRI GRAFICE ALE PROCESELOR TERMODINAMICE

Procesele termodinamice, numite și *transformări de stare* sunt fenomene termice în care parametrii de stare se modifică. Pentru a indica evoluția parametrilor de stare, vom folosi simboluri cu următoarele semnificații: $\nearrow$ – „crește" și respectiv $\searrow$ – „scade".

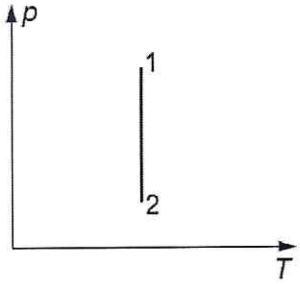
Transformarea izotermă



(a)



(b)



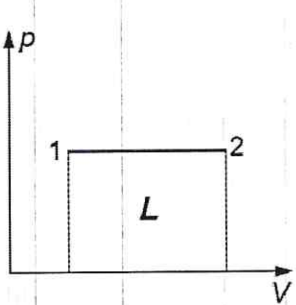
(c)

În coordonate $p-V$ se reprezintă grafic funcția $p=\dfrac{\nu RT}{V}=\dfrac{\text{const.}}{V}$ care exprimă faptul că presiunea variază invers proporțional cu volumul, iar graficul este o hiperbolă echilateră, așa cum observăm în figura **(a)**. În coordonate $V-T$ și $p-T$ graficul este segment de dreaptă perpendicular pe axa temperaturii deoarece $T=\text{const.}$, așa cum observăm în figurile **(b)** și **(c)**.

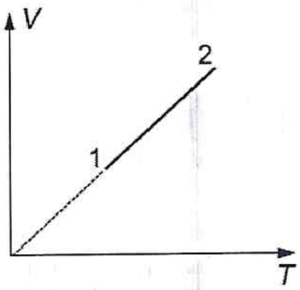
Evoluția parametrilor:

- Destindere izotermă $(1 \to 2)$: $V\nearrow$, $p\searrow$, $T=\text{const.}$
- Comprimare izotermă $(2 \to 1)$: $V\searrow$, $p\nearrow$, $T=\text{const.}$

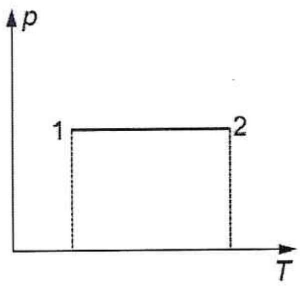
Transformarea izobară



(a)



(b)



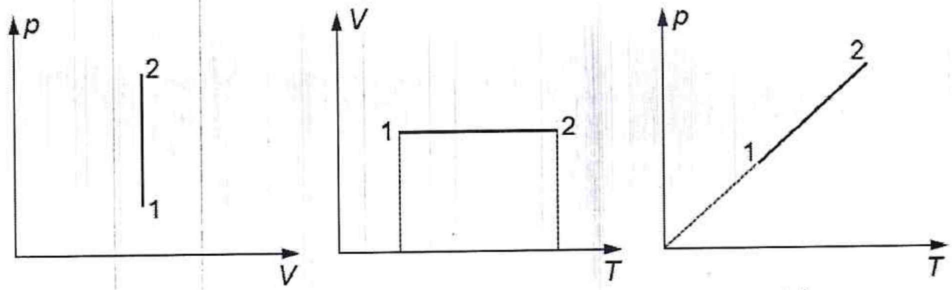
(c)

În coordonate $V-T$, în figura **(b)**, se reprezintă grafic funcția $V=\frac{\nu R}{p}T=\text{const}\cdot T$ care exprimă faptul că volumul gazului variază direct proporțional cu temperatura absolută, iar graficul este un segment situat pe o dreaptă care trece prin origine. În coordonate $p-V$ și $p-T$ graficul este segment de dreaptă perpendicular pe axa presiunii deoarece $p=\text{const.}$, așa cum observăm în figurile **(a)** și **(c)**.

Evoluția parametrilor:

- Destindere / încălzire / dilatare izobară $(1\rightarrow 2)$: $T\nearrow, V\nearrow,\ p=\text{const.}$
- Comprimare / răcire / contracție izobară $(2\rightarrow 1)$: $T\searrow,\ V\searrow,\ p=\text{const.}$

Transformarea izocoră



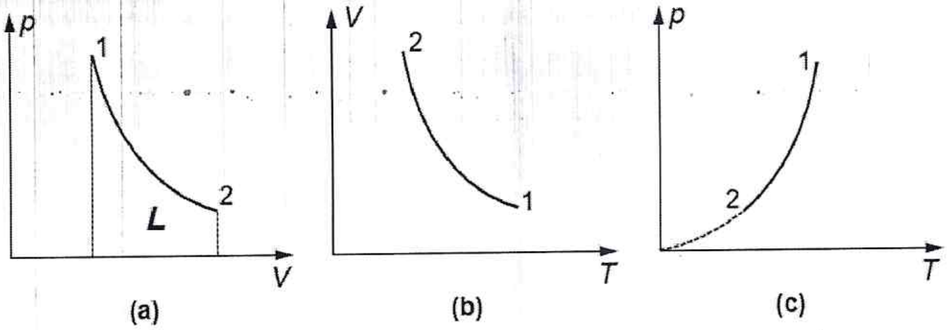
(a) (b) (c)

În coordonate $p-T$, în figura **(c)**, se reprezintă grafic funcția $p=\frac{\nu R}{V}T=\text{const}\cdot T$ care exprimă faptul că presiunea gazului variază direct proporțional cu temperatura absolută, iar graficul este un segment situat pe o dreaptă care trece prin origine. În coordonate $p-V$ și $V-T$ graficul este segment de dreaptă perpendicular pe axa volumului deoarece $V=\text{const.}$, așa cum observăm în figurile **(a)** și **(b)**.

Evoluția parametrilor:

- Încălzire izocoră $(1\rightarrow 2)$: $T\nearrow,\ p\nearrow,\ V=\text{const.}$
- Răcire izocoră $(2\rightarrow 1)$: $T\searrow,\ p\searrow,\ V=\text{const.}$

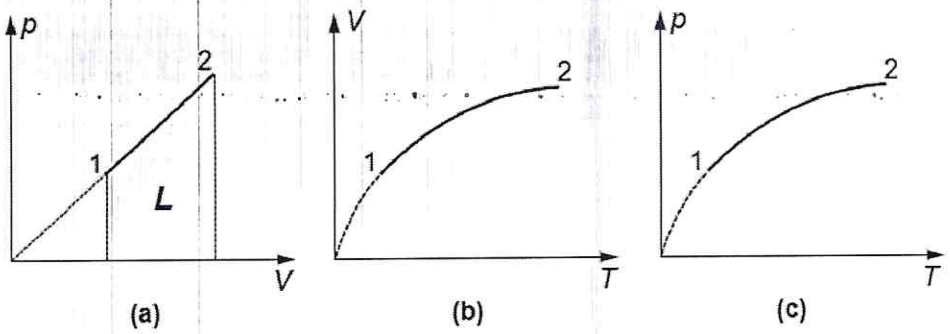
Transformarea adiabatică



Ținem cont de faptul că exponentul adiabatic, $\gamma = \frac{C_p}{C_V} = 1 + \frac{R}{C_V}$ este întotdeauna supraunitar. În coordonate $p-V$, în figura **(a)**, se reprezintă grafic funcția $p = \frac{\text{const.}}{V^\gamma}$ care exprimă faptul că presiunea gazului variază invers proporțional cu V^γ, unde $\gamma > 1$, iar graficul are alura unei hiperbole, asemenea graficului transformării izoterme. În coordonate $V-T$, în figura **(b)**, se reprezintă grafic funcția $V = \frac{\text{const.}}{T^{\frac{1}{\gamma-1}}}$ care exprimă faptul că volumul gazului variază invers proporțional cu $T^{\frac{1}{\gamma-1}}$, unde $\frac{1}{\gamma-1} > 1$, iar graficul are tot alura unei hiperbole. În coordonate $p-T$, în figura **(c)**, se reprezintă grafic funcția $p = \text{const}\cdot T^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$, care exprimă faptul că volumul gazului variază direct proporțional cu $T^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$, unde $\frac{\gamma}{\gamma-1} > 1$, iar graficul are alura unei parabole care trece prin origine.

Evoluția parametrilor:
- Destindere adiabatică $(1 \to 2)$: $V \nearrow$, $p \searrow$, $T \searrow$.
- Comprimare adiabatică $(2 \to 1)$: $V \searrow$, $p \nearrow$, $T \nearrow$.

Transformarea politropă $p = aV$, $a = const.$, $a > 0$



În coordonate $p-V$, în figura **(a)**, se reprezintă grafic funcția $p = a \cdot V$ care exprimă faptul că presiunea gazului variază direct proporțional cu volumul, iar graficul este un segment situat pe o dreaptă care trece prin origine. În coordonate $V-T$, în figura **(b)**, se reprezintă grafic funcția $V = \sqrt{\frac{\nu RT}{a}} = \text{const} \cdot \sqrt{T}$, care exprimă faptul că volumul gazului variază cu $\sqrt{T}$, iar graficul se aseamănă cu graficul funcției radical (parabolă rotită cu 90°). În coordonate $V-T$, în figura **(c)**, se reprezintă grafic funcția $p = \sqrt{a\nu RT} = \text{const} \cdot \sqrt{T}$, care exprimă faptul că presiunea gazului variază cu $\sqrt{T}$, iar graficul se aseamănă cu graficul funcției radical (parabolă rotită cu 90°).

Evoluția parametrilor:

- Destindere $(1 \to 2)$: $V \nearrow$, $p \nearrow$, $T \nearrow$.
- Comprimare $(2 \to 1)$: $V \searrow$, $p \searrow$, $T \searrow$.

Observație: Lucrul mecanic efectuat într-un proces termodinamic este numeric egal cu aria de sub graficul funcției $p = f(V)$, arie considerată pozitivă dacă volumul crește și negativă dacă volumul scade.