

## MĂSURĂTORI EXPERIMENTALE ȘI ANALIZA DATELOR EXPERIMENTALE

### **Dimensiuni și unități**

În studiul transferului de căldură sunt implicate o diversitate de caracteristici specifice ce trebuie descrise atât din punct de vedere calitativ, cât și din punct de vedere cantitativ. Aspectul calitativ înseamnă identificarea naturii sau tipului caracteristicii (de ex., lungime, viteză sau temperatură), în timp ce aspectul cantitativ furnizează o măsură numerică.

*Descrierea calitativă* este dată în funcție de dimensiuni, clasificate în mărimi fundamentale și derivate. Ca exemple de *dimensiuni fundamentale* avem L – lungime, M – masă, t – timp, T – temperatură (Tab. 1). Toți ceilalți parametri fizici utilizați în transferul de căldură se pot exprima în funcție de dimensiunile fundamentale. Ca exemple de *dimensiuni derivate* avem: suprafața  $A = L^2$ , viteza  $V = L t^{-1}$  sau căldura specifică,  $c_p = L^2 t^{-2} T^{-1}$ .

*Descrierea cantitativă* implică utilizarea unui număr și a unui standard, cu ajutorul căruia diferite cantități pot fi comparate. Spre exemplu, un standard pentru lungime poate fi metrul, pentru timp poate fi secunda, iar pentru temperatură poate fi Kelvin. Aceste standarde se numesc *unități* și sunt diverse sisteme de unități utilizate în lumea întreagă.

În țara noastră, standardul este reprezentat de Sistemul Internațional (SI), iar pe alocuri se mai utilizează sistemul tehnic (ST). În țările bazate pe sistemul englez, se utilizează British Gravitational (BG) sau English Engineering (EE).

În acest îndrumar de laborator este utilizat **Sistemul Internațional (SI)** cu multiplii și submultiplii uzuali standardizați.

*Tabel 1. Unități de măsură fundamentale (SI)*

Dimensiune	Simbol	Denumire
Lungime	m	metru
Masă	kg	kilogram
Timp	s	secundă
Temperatură	K	Kelvin
Intensitatea curentului electric	A	amper
Intensitatea luminoasă	cd	candela
Cantitatea de substanță	mol	mol

**Metrul** – reprezintă unitatea de măsură pentru lungime și este egal cu 1.650.763,73 lungimi de undă în vid a radiației care corespunde tranziției între nivelele de energie  $2p_{10}$  și  $5d_5$  ale atomului de kripton 86;

**Kilogramul** – reprezintă unitatea de măsură pentru masă și este egal cu masa prototipului internațional pentru masă;

**Secunda** – reprezintă unitatea de măsură pentru timp și este egală cu durata a 9.192.631.770 perioade ale radiației care corespunde tranziției între cele două nivele de energie hiperfine ale stării fundamentale ale atomului de Cs 133;

**Kelvin** – reprezintă unitatea de măsură a temperaturii termodinamice și este fracțiunea  $1/273,16$  din temperatura termodinamică a punctului triplu al apei;

**Amperul** – reprezintă unitatea de măsură pentru intensitatea curentului electric constant, care menținut între două conductoare paralele, rectilinii, cu lungimea infinită și cu secțiunea circulară neglijabilă, așezate în vid la o distanță de 1 metru unul de altul, produce între acestea o forță de  $2 \cdot 10^{-7}$  Newton pe o lungime de 1 metru;

**Candela** – reprezintă unitatea de măsură pentru intensitatea luminoasă, în direcția normalei, a unei suprafețe ce are aria de  $1/600.000$  m<sup>2</sup> a unui corp negru la temperatura de solidificare a platinei la presiunea de 101.325 N / m<sup>2</sup>;

**Molul** – reprezintă unitatea de măsură pentru cantitatea de substanță a unui sistem care conține atâtea entități elementare câți atomi există în 0,012 kilograme de carbon 12. Masa de 0,012 kg de carbon 12 conține un număr de atomi egal cu numărul lui Avogadro,  $N = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Mai sunt două unități de măsură suplimentare, fără de care geometria plană și în spațiu nu ar putea funcționa:

**Radianul** – reprezintă unghiul plan cuprins între două raze care delimitează pe circumferința unui cerc un arc de lungime egală cu cea a razei. Unghiul de 1 radian este egal cu unghiul de  $(180/\pi)$  grade sexazecimale, care corespund valorii de  $57^\circ 17' 45''$ ;

**Steradianul** – reprezintă unghiul solid care, având vârful în centrul unei sfere, delimitează pe suprafața acesteia o arie egală cu a unui pătrat a cărei latură este egală cu raza sferei.

*Tabel 2. Constante semnificative*

Denumire	Simbol	Valoare
	$\pi$	3,141 592 653
	e	2,718 281 828
Avogadro	$N_A$	$6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Boltzmann	k	$1,381 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
Constanta gazului ideal	R	$8,315 \times 10^3 \text{ kJ K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
Faraday	$F = e \times N_A$	$9,648 \times 10^4 \text{ C mol}^{-1}$
Masa de repaus a electronului	$m_e$	$9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Planck	h	$6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}$
Sarcina elementară	e	$1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$
Stefan-Boltzmann	$\sigma$	$5,671 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
Unitatea atomică de masă	u	$1,661 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Viteza luminii în vid	c	$2,998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

*Tabel 3. Factori de multiplicare / demultiplicare*

Factor	Prefix	Simbol
$10^{24}$	yotta	Y
$10^{21}$	zetta	Z
$10^{18}$	exa	E
$10^{15}$	peta	P
$10^{12}$	tera	T
$10^9$	giga	G
$10^6$	mega	M
$10^3$	kilo	k
$10^2$	hecto	h
$10^1$	deca	da
$10^0$	–	–
$10^{-1}$	deci	d
$10^{-2}$	centi	c
$10^{-3}$	milli	m
$10^{-6}$	micro	$\mu$
$10^{-9}$	nano	n
$10^{-12}$	pico	p
$10^{-15}$	femto	f
$10^{-18}$	atto	a
$10^{-21}$	zepto	z
$10^{-24}$	yocto	y

## Erori de măsurare. Clasificare

*Erori de măsură* (sau inevitabile): sunt datorate imperfecțiunii simțurilor și a aparatelor.

*Erori de rotunjire*: sunt erorile datorate intervenției numerelor iraționale; în calcul, suntem nevoiți să păstrăm un număr limitat, dar suficient de zecimale; astfel erorile pot fi neglijate.

*Erori de metodă*: apar atunci când suntem nevoiți să înlocuim problema propusă cu alta, aproximativă, chiar dacă datele inițiale ar fi cunoscute exact și calculele ar fi făcute exact.

Se mai pot clasifica astfel:

*Erori sistematice* - se pot caracteriza prin faptul că se produc în același sens; acestea pot fi reduse introducând corecții adecvate.

- *erori instrumentale* cauzate de defecțiuni ale aparatului de măsură (etalonare defectuoasă, deplasarea scalei etc.);
- *erori personale* cauzate de lipsuri în deprinderile și dexteritatea experimentatorului;
- *erori teoretice* cauzate de neglijarea unor factori fizici sau unor acțiuni exterioare permanente sau de formule de calcul imprecise sau greșite.

*Erori accidentale* (întâmplătoare, aleatorii) - se pot caracteriza prin faptul că se produc atât într-un sens cât și în celălalt și se datorează unor factori variabili sau nedeterminați.

*Erori grosolane* (greșeli) - erori mai mari decât erorile obișnuite și apar datorită neatenției experimentatorului (citire greșită la un aparat, notație greșită a rezultatului, confuzie, omisiuni).

### Erorile instrumentale (ale mijloacelor de măsurare)

Condițiile de referință ale unui mijloc de măsurare sunt acele condiții fixate de constructor, pentru o utilizare cât mai corectă a mijlocului de măsurat.

Mijloacele de măsurare sunt caracterizate de **sensibilitate**, **justețe**, **precizie** și **fidelitate**.

Sensibilitatea unui aparat de măsură – reprezintă raportul dintre deplasarea indicelui și variației mărimii de măsurat căreia îi corespunde o anumită deplasare. Sensibilitatea unui aparat poate fi constantă, dacă aparatul respectiv are scara gradată liniară și variabilă, dacă scara gradată este neliniară. De exemplu, în cazul balanțelor cu brațe egale sensibilitatea este variabilă.

Pragul de sensibilitate – reprezintă variația cea mai mică a măsurandului care produce o deplasare sensibilă a indicelui.

Justețea unei măsurii – reprezintă capacitatea unui aparat de a permite măsurări cu erori minime.

Eroarea de justețe a unei măsurii reprezintă diferența dintre valoarea nominală  $x_n$  a măsurii și media aritmetică  $x_m$  a valorilor efective stabilite ca urmare a unui șir de măsurări consecutive determinate în condiții de referință ale aparatului respectiv.

Această eroare poate fi eliminată prin introducerea corecțiilor de justețe. Astfel, se scade eroarea de justețe din valoarea nominală a măsurii, respectiv a aparatului, după cum se dorește eliminarea erorii de justețe a unei măsurii, respectiv a unui aparat de măsură.

Fidelitatea unui aparat de măsură – reprezintă o caracteristică potrivit căreia sunt oferite indicații cât mai apropiate între ele de măsurarea repetată a aceleiași mărimi, în aceleași condiții de măsurare.

Eroarea de fidelitate – reprezintă diferența dintre indicația specifică valorii celei mai mari și indicația specifică valorii celei mai mici, pentru mărimea de măsurat.

Ca magnitudine, justețea și fidelitatea sunt invers proporționale cu erorile corespunzătoare lor.

Precizia – reprezintă caracteristica unui aparat de măsură de a oferi indicații cât mai apropiate de valoarea efectivă a valorii măsurate.

Eroarea de precizie a unui aparat de măsură – reprezintă eroarea totală a aparatului de măsură ce funcționează în condițiile de referință.

Precizia unui aparat de măsură este invers proporțională cu eroarea de precizie.

**Eroarea tolerată** a unui mijloc de măsurare reprezintă valoarea absolută maximă a erorii de precizie, admisă de standarde.

**Eroarea de indicație** reprezintă diferența dintre indicația aparatului și valoarea efectivă a măsurandului.

**Eroarea raportată a indicației** reprezintă raportul dintre eroarea de indicație și limita superioară de măsurare a aparatului de măsură.

**Eroarea de paralaxă** apare când indicatorul nu este în planul scării gradate, iar observatorul nu privește perpendicular pe suprafața scării gradate.

Clasa de precizie – reprezintă o valoare stabilită conform standardelor, pentru ansamblul aparatelor de măsură care sunt supuse aceluiași condiții de precizie. De regulă, clasa de precizie exprimă eroarea relativă procentuală din limita superioară a indicației aparatului de măsură.

## **Incertitudine**

Așa cum s-a arătat, toate lucrările experimentale conțin erori – cum validăm datele, analiza datelor experimentale?

Conceptul de incertitudine reprezintă “cea mai bună estimare pe care o poate face inginerul despre cum vor arăta datele înainte de a începe efectuarea experimentelor”. Estimarea se poate face:

- pentru un instrument dat: experiența anterioară, lizibilitatea afișajului, datele tehnice ale instrumentului, calibrări efectuate.
- pe baza cantităților măsurate:

$$\omega_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} \omega_{x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} \omega_{x_2} \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_3} \omega_{x_3} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} \omega_{x_n} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

sau, mai util de exprimat procentual:

$$\frac{\omega_R}{R} = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} \frac{\omega_{x_1}}{R} \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} \frac{\omega_{x_2}}{R} \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_3} \frac{\omega_{x_3}}{R} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} \frac{\omega_{x_n}}{R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Formule utile:

- dacă  $R = x^m \cdot y^n \cdot z^p$ , atunci 
$$\frac{\omega_R}{R} = \left[ \left( \frac{m}{x} \omega_x \right)^2 + \left( \frac{n}{y} \omega_y \right)^2 + \left( \frac{p}{z} \omega_z \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

- dacă  $R = x + y$ , atunci 
$$\frac{\omega_R}{R} = \left[ \frac{\omega_x^2 + \omega_y^2}{(x + y)^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

- dacă  $R = x - y$ , atunci 
$$\frac{\omega_R}{R} = \left[ \frac{\omega_x^2 + \omega_y^2}{(x - y)^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Exemple:

1. Momentul de inerție pentru o bară de secțiune transversală rectangulară este:  $I = bh^3/12$ . Incertitudinea măsurării pentru  $b$  este  $\pm 0,2\%$ , în timp ce pentru  $h$  este  $\pm 0,5$ .

Care este incertitudinea relativă în  $I$ ?

2. Deflexia unei bare încastrate este definită: 
$$\delta = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I}$$

unde  $P$  este încărcarea (forța),  $P \pm 1\%$ ,  $L$  este lungimea barei,  $L \pm 0.5\%$ ,  $E$  este modulul de elasticitate,  $E \pm 2\%$ , și  $I$  este momentul de inerție,  $I \pm 1\%$ .

Determinați incertitudinea relativă în  $\delta$ .

3. Măsurarea unui debit masic de apă în plaja de valori 10 – 50 kg/s, prin măsurarea timpului în care este cântărită o cantitate de 40 de kg de apă. Eroare de măsurare pentru timp este 0,2 secunde, iar pentru masă este 1%.



## MĂSURAREA TEMPERATURII

### Generalități

Temperatura reprezintă un parametru de stare a unui corp. Definiția temperaturii legale este dată de două condiții :

- prima condiție definește raportul a două temperaturi și este realizată prin admiterea proporționalității dintre produsul ( $pV$ ) și temperatura unui gaz în stare perfectă:

$$p \cdot V = R \cdot T \quad (1)$$

Temperatura astfel definită formează scara absolută a temperaturilor (**scara Kelvin**).

- a doua condiție definește notarea numerică a temperaturii în condiții fizice precizate, ceea ce duce evident și la stabilirea concomitentă a unității de măsură. Această condiție este realizată admițând că pentru punctul triplu al apei avem temperatura de 273,16 K.

În scara de temperatură astfel definită, apa distilată la presiunea normală de o atmosferă fizică are temperatura de solidificare de 273,15 K și cea de fierbere de 373,15 K. Rezultă deci că intervalul de temperaturi între punctele de solidificare și de fierbere ale apei la această presiune este de 100 grade. Acest lucru se datorează faptului că inițial scara temperaturilor, deci și unitatea de măsură, a fost definită astfel încât această diferență să fie 100 grade, de unde și denumirea de grad-centigrad. În scara centigradă de temperaturi (**scara Celsius**), mai comodă pentru măsurarea temperaturilor uzuale în mediul ambiant, valoarea unității de măsură (gradul) este aceeași, dar originea este schimbată:

- temperatura normală de solidificare a apei 273,15 K = 0 °C
- temperatura normală de fierbere a apei 373,15 K = 100 °C.

Temperaturile absolute se notează cu  $T [K]$ , iar în scara Celsius  $T [^{\circ}C]$ . Corespondența numerică este:

$$T [K] = (T - 273,15) [^{\circ}C] \quad T [^{\circ}C] = (T + 273,15) [K]$$

Temperatura este un parametru important al stării termice a unui corp. Valoarea acestui parametru determină condiția de echilibru termic, cât și sensul în care se produc schimbările de căldură între corpuri.

Se consideră două medii separate printr-un perete. Se presupune că cele două medii se aflau, fiecare în parte, în echilibru în starea inițială. La stabilirea contactului celor două medii cu peretele comun de separare se va observa, în general un proces fizic care modifică starea ambelor medii. Modificările de stare se datorează unui schimb de energie prin peretele despărțitor între cele două medii. Se spune că energia astfel schimbată este sub formă termică sau că cele două medii schimbă căldură între ele. După un timp suficient, procesul încetează, cele două medii ajungând în echilibru termic.

Experiențele arată întotdeauna că:

*Două medii în echilibru termic cu un al treilea sunt în echilibru și între ele.*

Acesta este enunțul clasic al **principiului zero al termodinamicii**.

Rezultă deci că temperatura este proprietatea comună care asigură echilibrul termic al mai multor medii. Pe această cale se poate studia, pentru diferite medii legătura dintre diferiți parametri măsurabili și temperatură. Se poate întocmi o listă a acelor parametri de care temperatura este univoc legată.

Pentru a defini temperatura ca parametru măsurabil se poate admite o relație arbitrară  $T = T(x)$ , în care  $x$  este un parametru măsurabil. Funcția  $T(x)$  trebuie aleasă astfel încât să îndeplinească două condiții:

- temperatura  $T$  să fie univoc determinată de  $x$ ;
- valorile temperaturilor ce rezultă din relație trebuie să fie în acord cu ordonarea ce rezultă din definiția inegalității a două temperaturi.

Pe aceste considerente au fost concepute o serie întreagă de metode și aparate de determinare a temperaturii.

## Scopul lucrării:

Metodele și aparatele pentru măsurarea temperaturii se clasifică (funcție de proprietatea fizică utilizată pentru determinarea ei) în două grupe mari:

- Grupa I -a care conține metode de măsurare a temperaturii prin care aparatul de măsură este pus **în contact direct** cu corpul a cărui temperatură dorim să o determinăm.
- Grupa a-II-a care conține metode de măsurare a temperaturii de la distanță, **fără contact direct**.

În **prima parte** se prezintă două din cele mai des utilizate metode din prima grupă, și anume:

- A. Metode care au la bază dilatarea termică și variația presiunii corpului termodinamic cu temperatura (termometre de sticlă cu lichid, termometre manometrice, etc.).
- B. Metode care au la bază variația rezistenței electrice a corpurilor cu temperatura (termometre cu rezistență electrică).

În **partea a doua** sunt expuse metodele de determinare a temperaturii bazate pe:

- C. Radiație termică (pirometrul optic, pirometrul de radiație, camera cu termoviziune)
- D. Măsurarea forței electromotoare ce ia naștere între sudura caldă și rece a două metale diferite (termocupluri).

În **partea a treia** este prezentată metoda de determinare a răspunsului tranzitoriu al termocuplului.



## PARTEA I

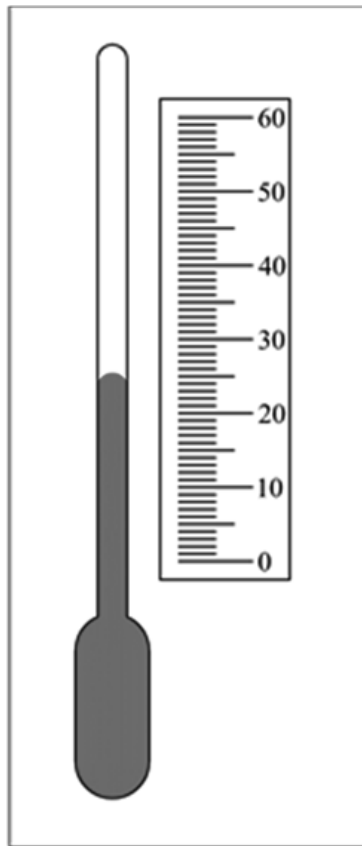
### Metodica experimentală a lucrărilor din grupele A și B

- A. Metode care au la bază **dilatația termică** și **variația presiunii** corpului termodinamic cu temperatura:

#### Termometrul de sticlă cu lichid

Funcționează în baza diferenței existente între coeficienții de dilatare volumetrică a lichidului  $\beta_l$  și a sticlei  $\beta_s$  din care este executat tubul capilar.

Condiția este ca :  $\beta_l \gg \beta_s$



*Fig. 1. Termometru de sticlă cu lichid*

Ca lichid termometric se folosește mercurul, toluenul, alcoolul etilic, eterul de alcool și pentanul. Cea mai largă răspândire a căpătat-o însă mercurul care se menține în stare lichidă, la presiune normală, într-un interval cuprins între  $-38,86\text{ }^{\circ}\text{C}$  și  $+356,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Termometrele de sticlă cu lichid sunt prevăzute cu scară de temperatură, iar temperatura se determină direct prin citirea înălțimii coloanei de lichid.

### Termometrele cu contact

Reprezintă o variantă a termometrelor de sticlă cu mercur. Acestea pot fi de mai multe tipuri constructive. Cel din laborator este un termometru cu contact deplasabil. Acest termometru funcționează ca un contact normal deschis al unei instalații electrice. Poziționarea contactului la temperatura dorită se realizează prin rotirea șurubului. La atingerea temperaturii prestabilite, circuitul electric se închide prin mercur, firul de contact, piulița și șurubul de reglaj.

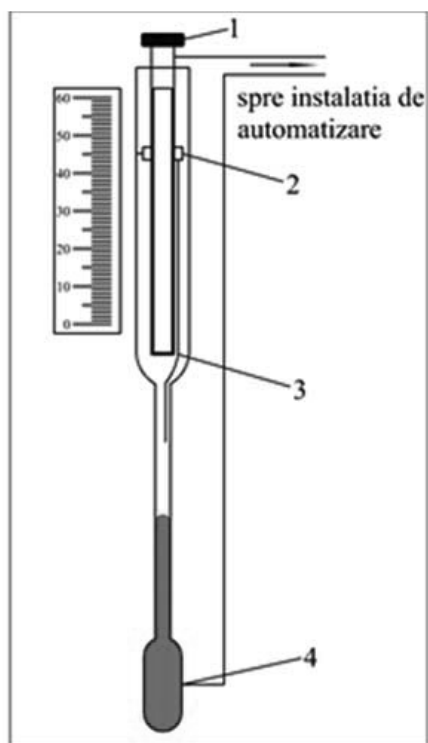


Fig. 2. Termometrul cu contact

Termometrul (de sticlă) cu contact poate fi întrebuințat la:

- semnalizarea stingerii unei anumite temperaturi
- menținerea unei anumite temperaturi într-o instalație automatizată.

### Termometrele manometrice

Funcționarea acestor termometre se bazează pe principiul variației unui parametru de stare (de exemplu, presiunea) cu temperatura.

Funcționarea termometrului manometric este identică cu cea a unui manometru cu tub Bourdon. Presiunea unui fluid închis într-un spațiu etanș, tubul Bourdon (2), variază funcție de temperatura la care este supus rezervorul de lichid (1). Când rezervorul de lichid este pus în contact cu corpul a cărui temperatură trebuie măsurată, se modifică presiunea fluidului din tubul Bourdon, iar capătul liber al acestuia acționează mecanismul cu roată dințată care are atașat acul indicator (3) al instrumentului. Aceste termometre sunt gradate direct într-o scară de temperaturi.

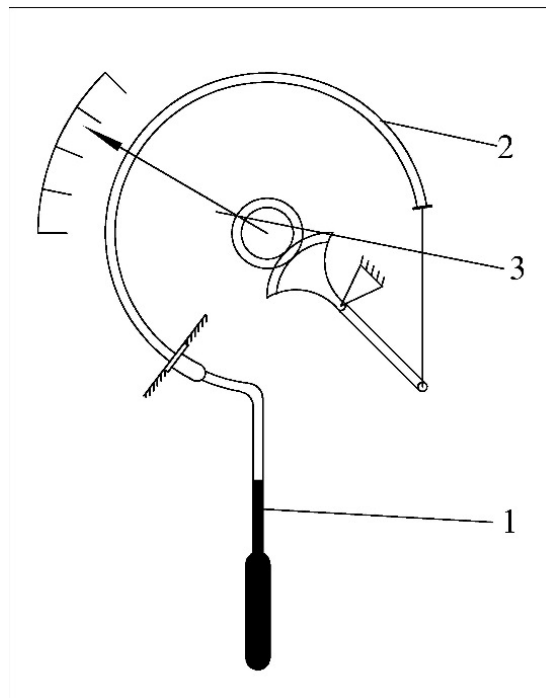


Fig. 3. Schema de principiu a unui termometru manometric

**B. Metode de măsurare a temperaturii prin variația rezistenței electrice:**  
termometrele cu rezistență electrică.

Aceste instrumente se bazează pe principiul variației rezistenței electrice a diferitelor metale funcție de temperatură. În figura de mai jos este indicată variația relativă a rezistenței cu temperatura pentru diferite metale.

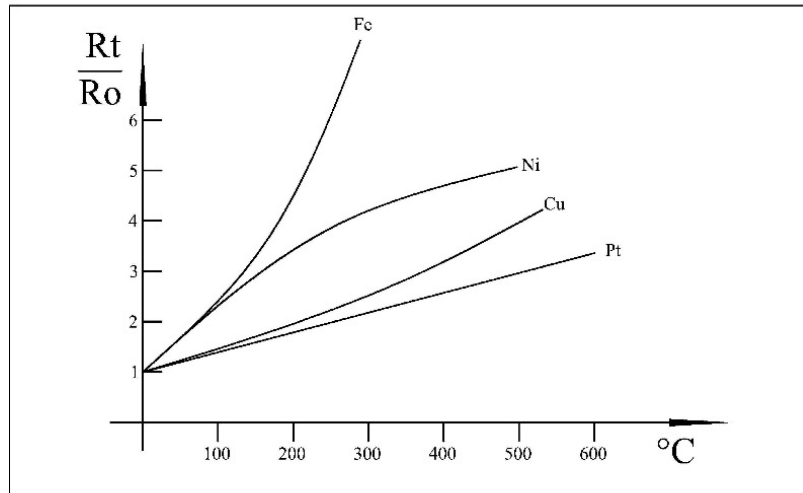


Fig. 4. Variația relativă a rezistenței electrice funcție de temperatură

**Metoda punții neechilibrate**

Schema punții neechilibrate este prezentată în figura de mai jos:

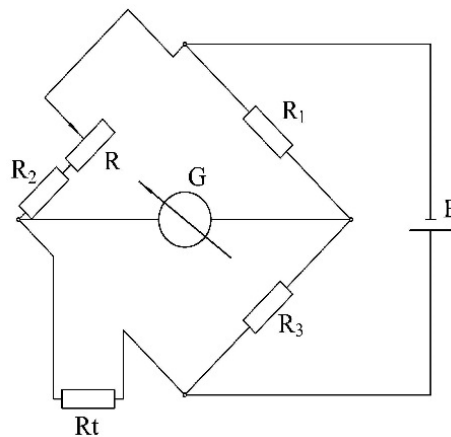


Fig. 5. Schema electrică a metodei punții neechilibrate



Principiul metodei constă în aceea că, la variația termorezistenței  $R_t$  cu temperatura, apare curent electric prin galvanometrul  $G$  înseriat în diagonala punții. Curentul electric ce trece prin galvanometru va fi cu atât mai mare cu cât dezechilibrul punții este mai mare. Galvanometrul poate fi etalonat direct în grade de temperatură.

### Metoda logometrului

Logometrul este un aparat care măsoară raportul dintre doi curenți. Spre deosebire de galvanometre, la logometre sistemul mobil este format din două cadre rigid legate între ele. În figura de mai jos este prezentată schema de principiu, simplificată, de măsurare cu ajutorul unui logometru.

Prin cele două cadre 1 și 2 ale sistemului mobil trec curenți de sensuri contrare, ceea ce duce la crearea cuplurilor de rotație în sensuri contrare. În poziția zero a logometrului, termorezistența  $R_t$  este egală cu rezistența fixă  $R$ , iar cei doi curenți care trec prin logometru sunt egali și de sensuri contrare.

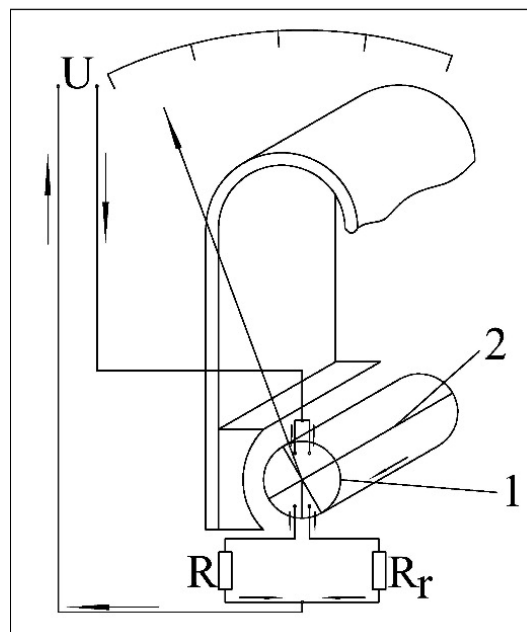


Fig. 6. Schema de principiu a unui logometru

Imediat ce termorezistența  $R_t$  în urma încălzirii (sau răcirii) își va schimba valoarea, prin unul din cadre va trece un curent mai mare și dispăre echilibrul dintre cuplurile de rotație. Întregul ansamblu se va roti în sensul de acțiune al cuplului mai mare.

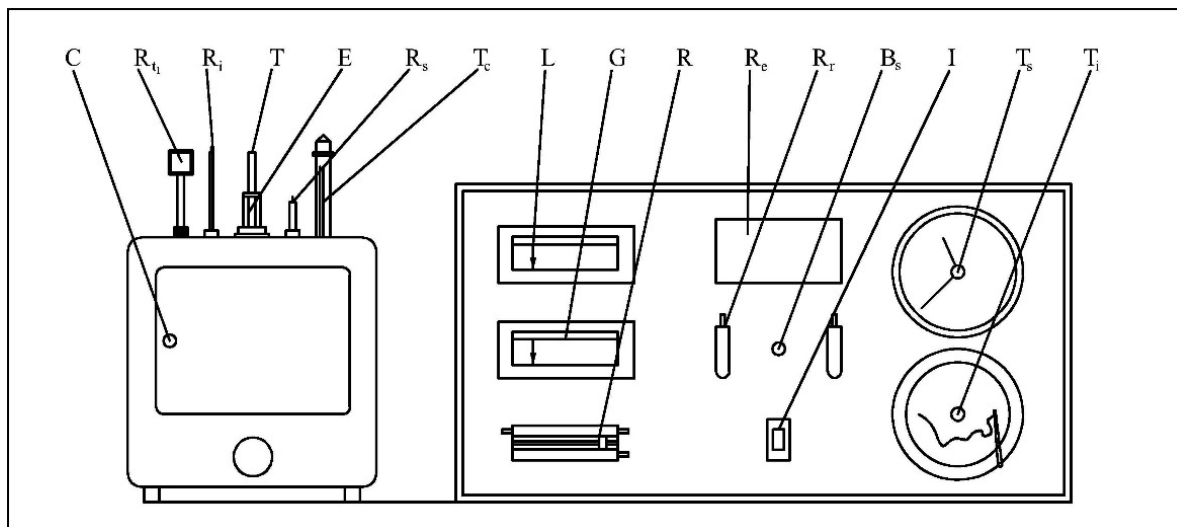
La galvanometrele obișnuite, rotirea cadrului este contrabalansată de cuplul antagonist al arcurilor spirale. În acest caz echilibrul sistemului se va stabili când cuplul activ al cadrului mobil va fi egal cu cuplul antagonist al arcurilor. Logometrul nu are arcuri spirale care să realizeze această funcțiune, iar echilibrul se realizează datorită unor forme speciale ale miezului.

Unghiul de deviație al acului indicator al logometrului este proporțional cu variația rezistenței  $R_t$  și prin urmare cu variația temperaturii sesizată de această rezistență. Acest lucru face posibilă gradarea logometrului direct într-o scară de temperatură.

## Instalația experimentală și modul de lucru

În cadrul lucrării de laborator vor fi făcute determinări ale temperaturii unui cuptor încălzit electric, folosind toate aparatele menționate în capitolul precedent. În figura de mai jos este prezentată schema instalației experimentale, și sunt identificate elementele componente și instrumentele utilizate.

- Pentru efectuarea experiențelor, se vor identifica în primul rând aparatele reprezentate în figură.
- Se va fixa apoi pe termometrul cu semnalizare ( $T_s$ ) o temperatură cuprinsă între 30-60 °C.
- Se va conecta întrerupătorul ( $I$ ) în poziția ”**Pornit**”. În acest fel întreaga instalație intră sub tensiune.
- Se va echilibra puntea prin intermediul reostatului ( $R$ ). În acest moment galvanometrul indică 20 °C.
- Instalația va fi lăsată sub tensiune aproximativ 30 de minute, pentru a putea obține o temperatură stabilizată a cuptorului.



*Fig. 7. Schema instalației de laborator*

- B<sub>s</sub> - bec de semnalizare
- C - cuptor
- E - eprubetă cu ulei
- G - galvanometru
- I - întrerupător general
- L - logometru
- R - reostat
- R<sub>C</sub> - rezistența de încălzire a cuptorului (în interiorul cuptorului)
- R<sub>e</sub> - releu
- R<sub>i</sub> - rezervorul termomanometrului înregistrator
- R<sub>r</sub> - redresor
- R<sub>s</sub> - rezervorul termomanometrului de semnalizare
- R<sub>t1</sub> - termorezistența logometrului
- R<sub>t2</sub> - termorezistența punții neechilibrate (în interiorul cuptorului)
- T - termometru cu mercur
- T<sub>c</sub> - termometru cu contact
- T<sub>i</sub> - termometru înregistrator
- T<sub>s</sub> - termometru cu semnalizare

## Date experimentale

Se vor face citiri cu toate cele cinci aparate de măsură a temperaturii. De asemenea, se va trasa diagrama de răcire a cuptorului cu termomanometrul înregistrator.

Se va efectua etalonarea termorezistenței cu galvanometrul G. Pentru aceasta, se vor face citiri ale termometrului (T) din 5 în 5 °C, concomitent citirii indicațiilor galvanometrului (G).

Rezultatele vor fi trecute într-un tabel de forma următoare:

*Tabel 1. Date experimentale*

Nr. Crt.	Indicația termometrului [°C]	Indicația galvanometrului [diviziuni]
1.		
2.		
⋮		

## Etalonarea termorezistenței

Se va trasa în final curba de etalonare a termorezistenței.

În cadrul lucrării de laborator se va urmări momentul atingerii temperaturii fixate pe termometrul cu semnalizare ( $T_s$ ). Soneria începe să sune și va fi oprită prin deplasarea contactului la o temperatură superioară lui 100 °C. De asemenea, la atingerea temperaturii de aproximativ 100 °C în cuptor, circuitul releului ( $R_e$ ) se închide, iar acesta va decupla automat alimentarea cu curent a cuptorului. Aceasta duce la răcirea cuptorului.

Când temperatura scade sub 100 °C, circuitul releului  $R_e$  se deschide, iar alimentarea cuptorului se realizează din nou. Ciclul se repetă de mai multe ori pe parcursul a 30 de minute cât instalația este cuplată la rețea.

După terminarea experienței, instalația va fi decuplată de la rețea prin intermediul întrerupătorului.

## PARTEA A II-A

### **Metodica experimentală a lucrărilor din grupele C și D**

#### **C. Metoda de determinare a temperaturii cu ajutorul pirometrelor optice**

Această metodă se bazează pe principiul radiației termice și se poate utiliza numai pentru corpuri a căror temperatură este între 700 °C și 4000 °C.

Caracteristic pentru pirometrele optice este faptul că pentru determinarea temperaturii nu este necesar un contact direct între corpul a cărui temperatură o măsurăm și aparat. Avantajele acestei metode sunt:

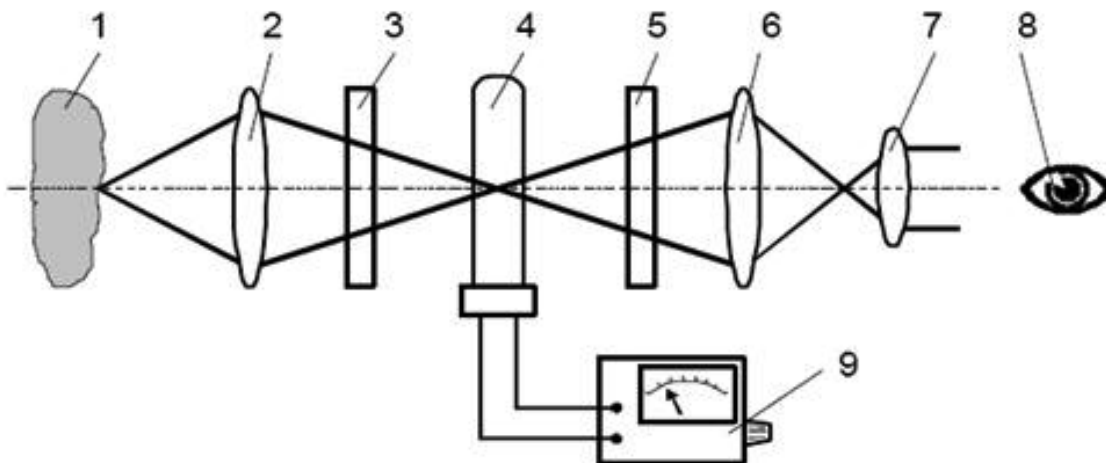
- măsurarea temperaturii se face fără contact direct, deci fără perturbarea mediului măsurat;
- limita superioară de măsurare a temperaturii este teoretic nelimitată;
- pot fi utilizate pentru măsurări de temperatură în medii în care condițiile fizice fac imposibilă aplicarea altor metode.

Pirometrele optice pot fi împărțite în două categorii după principiul lor de funcționare și anume :

- pirometre optice de comparație
- pirometre optice cu termocupluri.

Măsurarea temperaturii cu ajutorul **pirometrului optic de comparație** se bazează pe principiul egalizării luminozității filamentului (adică a strălucirii monocromatice) cu luminozitatea corpului a cărui temperatură se determină, folosindu-se sensibilitatea ochiului operatorului. Din acest motiv se poate estima că precizia metodei de măsurare este în mare măsură dependentă de experiența / subiectivitatea operatorului.

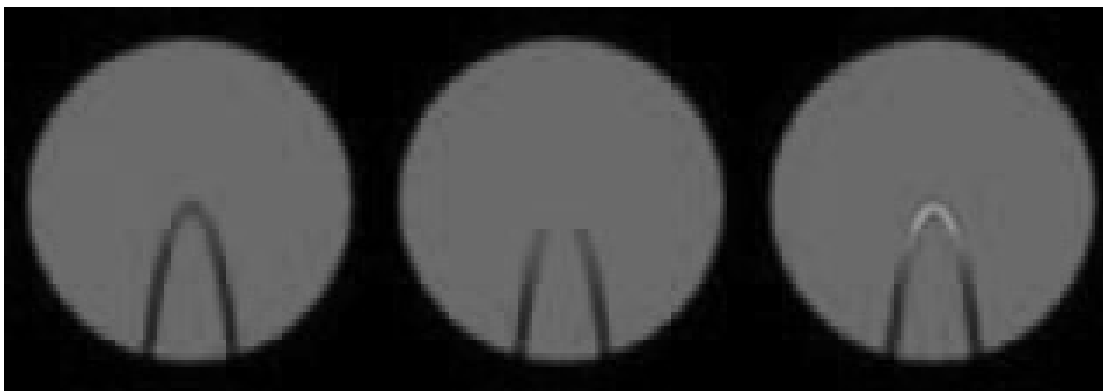
Schema de principiu a unui pirometru optic de comparație este prezentată în fig. 1.



*Fig. 1. Schema de principiu a unui pirometru optic de comparație*

- 1 – corp incandescent
- 2 – obiectiv (lentilă)
- 3 – filtru monocromatic (roșu) de absorbție (atenuare),  $T > 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 4 – filament
- 5 – filtru monocromatic (neutru)
- 6 – lentilă
- 7 – ocular
- 8 – operator
- 9 – sursa de alimentare, cu reglaj

Metoda de măsurare este o metodă de comparație. Pe imaginea de fundal a suprafeței corpului incandescent (1) ce emite o radiație în spectrul vizibil, se suprapune filamentul etalon (4). Prin reglarea curentului electric prin filament se modifică temperatura acestuia și implicit culoarea filamentului; în momentul în care imaginea filamentului dispare (imaginea din mijloc în figura de mai jos), se obține egalarea între temperatura măsurată și temperatura filamentului. Valoarea curentului prin filament constituie o indicație a temperaturii măsurate.



*Fig. 2. Principiul metodei pirometrului optic de comparație*

Măsurarea temperaturii unui corp prin această metodă a comparației este posibilă deoarece relația dintre temperatura reală  $T$  și temperatura de luminozitate  $T_{s,\lambda}$  este :

$$\frac{1}{T_{s,\lambda}} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\epsilon_{\lambda,T}} \quad (1)$$

valoarea constantei  $C_2$  fiind:

$$C_2 = 1,438 \cdot 10^{-2} [m \cdot grd] \quad (2)$$

Din această relație rezultă că temperatura de luminozitate a corpului nu depinde de lungimea de undă. Această lungime de undă corespunde lungimii de undă la care se face comparația între luminozitatea corpului negru și a corpului real, adică lungimii de undă a pirometrului de radiație monocromatic.

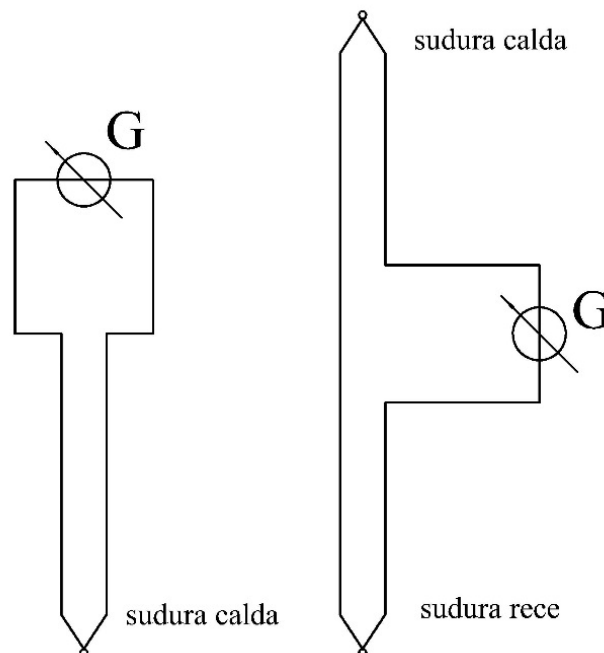
La **pirometrele optice cu termocupluri**, radiația termică a corpului a cărui temperatură dorim să o măsurăm, este captată de o lentilă suficient de mare și concentrată în focar. Aici se plasează sudura caldă a unui termocuplu.

#### D. Metoda de determinare a temperaturii cu ajutorul **termocuplurilor**

Termocuplul este un traductor activ realizat din diferite metale sau aliaje. Două conductoare de natură diferită (A și B) formează un circuit închis, capetele de îmbinare (numite și joncțiuni) fiind lipite. De obicei, o joncțiune se pune în contact cu corpul cald (sudura caldă), iar cealaltă se menține la o temperatură constantă (sudura rece). Atunci când joncțiunile se află la temperaturi diferite, în circuit apare o tensiune **termoelectromotoare (tem)** de valoare relativ redusă și proporțională cu temperatura.

Acesta este *efectul termoelectric direct* (numit și *efectul Seebeck* după fizicianul estonian Thomas Seebeck, care a descoperit acest fenomen în 1822) și reprezintă principiul de funcționare a termocuplurilor. Tensiunea apărută în circuitul termocuplului se măsoară cu ajutorul unui milivoltmetru (galvanometru) ce poate avea scala etalonată direct în grade.

Termocuplurile nu necesită surse de alimentare exterioare, căci energia necesară funcționării este preluată din mediul al cărei temperatură se măsoară.



*Fig. 3. Scheme de montare a termocuplurilor*

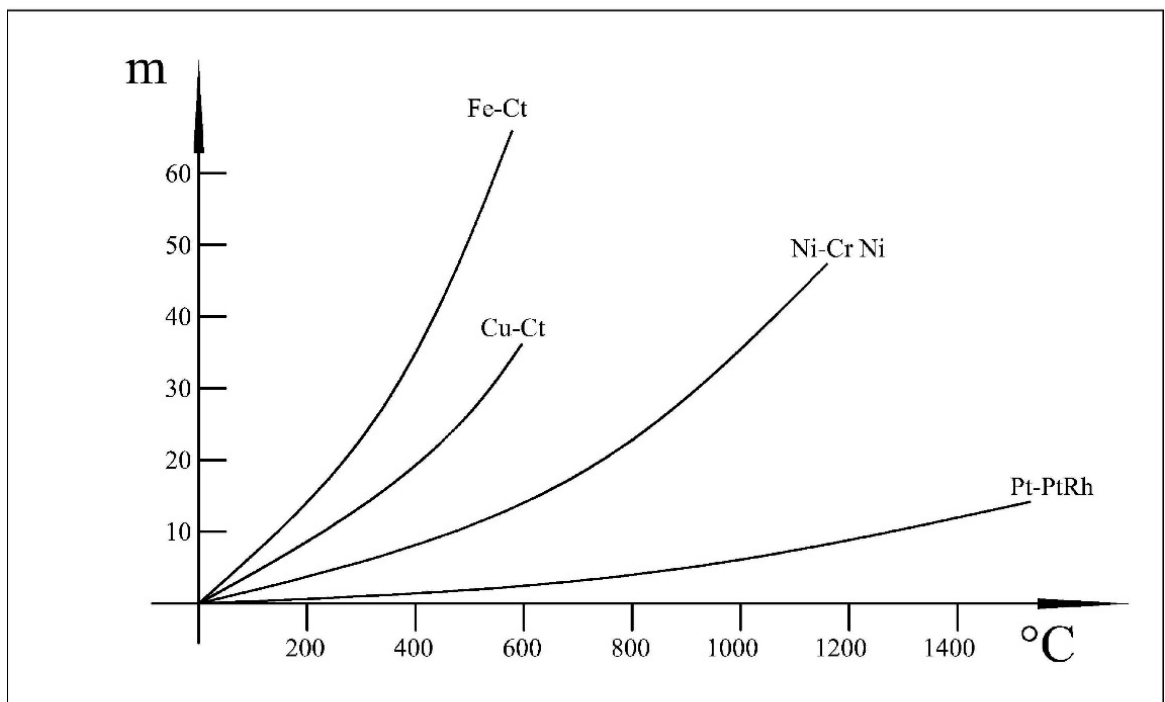


Galvanometrele pot fi montate la termocupluri în două moduri, prezentate în fig. 3:

- bornele galvanometrului constituie sudura rece
- galvanometrul este înseriat între sudura caldă și rece a termocuplului

Se remarcă un fapt important, și anume că termocuplurile permit să se aprecieze **diferența de temperatură între sudura caldă și cea rece**.

Deoarece formulele care exprimă tensiunea electromotoare în funcție de diferența de temperatură  $\Delta T$  dintre cele două suduri sunt aproximative, pentru fiecare cuplu de metale se trasează curbe de etalonare determinate experimental.



*Fig. 4. Curbe de etalonare pentru termocupluri*

## Instalația experimentală

Având în vedere că cele două metode C și D de determinare a temperaturii sunt înglobate în cadrul aceleiași lucrări, cele două instalații au elemente comune și sunt prezentate într-o schemă globală în figura de mai jos.

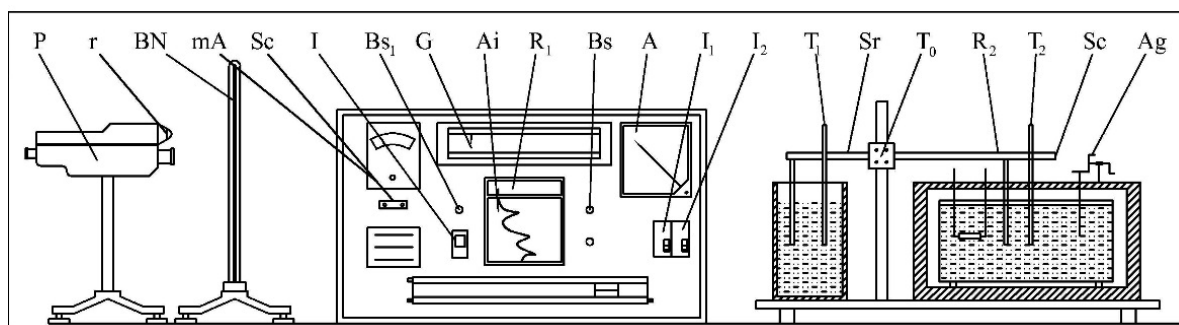


Fig. 5. Schema instalației experimentale

Notațiile sunt următoarele :

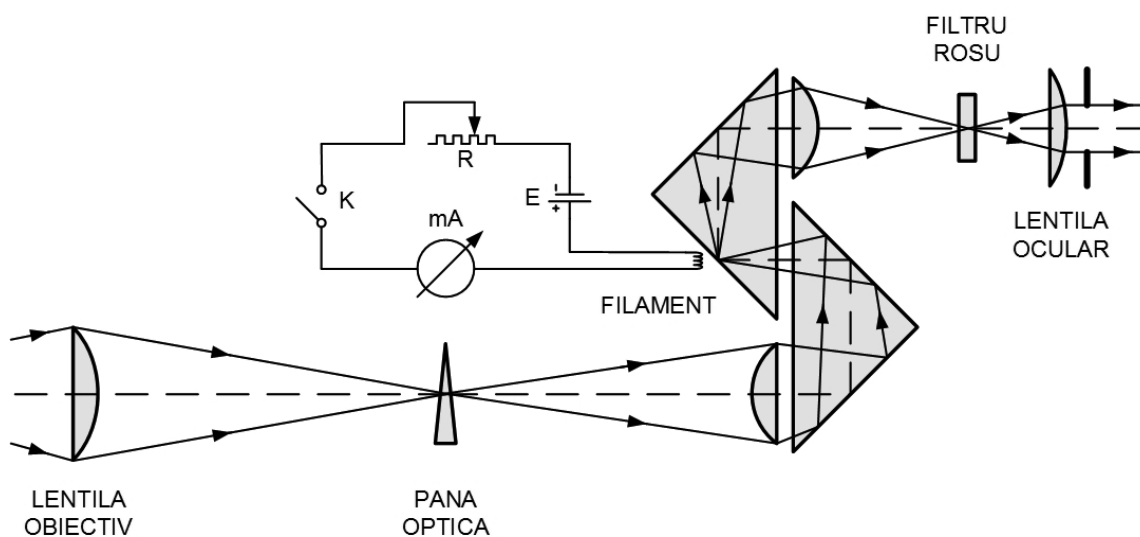
- A - ampermetru,
- Ag - agitator
- Ai - aparat înregistrator
- BN - bandă de nichelină
- Bs - bec de semnalizare
- Bs1 - bec de semnalizare pornit-oprit
- G - galvanometru
- I - întrerupător general
- I1 - întrerupător pirometru optic
- I2 - întrerupător termocupluri
- mA - miliampermetru
- P - pirometru optic
- R1 - reostat
- R2 - rezistență de încălzire
- r - reostat pirometru optic
- Sc - sudură caldă a termocuplului
- Sr - sudură rece a termocuplului
- Se - scară de etalonare
- T0 - suport termocuplu
- T1 - termometru sudură rece
- T2 - termometru sudură caldă

În cadrul metodei de determinare a temperaturii cu pirometru optic se vor efectua determinări ale temperaturii unei benzi de nichelină (BN) cu ajutorul unui pirometru optic (P) tip PIROLUX II.



*Fig. 6. Pirometru optic de comparație*

Schematic, acest pirometru este prezentat în figura 7.



*Fig. 7. Schema de funcționare a unui pirometru optic de comparație*

## Modul de lucru

Efectuarea unei determinări de temperatură parcurge următoarele faze :

- comutarea întrerupătorului general (I) în poziția pornit.
- rotirea butonului filtrelor monocromatice până apare filtrul de culoare albă
- rotirea ocularului într-un sens sau altul până când imaginea filamentului din interior este clară
- rotirea butonului filtrelor cenușii până când apare cifra 1. În felul acesta se pot face determinări pe scara de temperaturi a pirometrului, între 800 – 1400 °C.

Se continuă cu următoarele operații :

- se comută întrerupătorul pentru a alimenta cu curent banda de nichelină
- se manevrează cursorul reostatului până când ampermetrul indică un curent de aproximativ 15A
- se rotește pirometrul optic în astfel încât banda de nichelină să apară în centrul de vizare al pirometrului
- se rotește obiectivul într-un sens sau altul până când imaginea benzii de nichelină este clară.
- se rotește butonul reostatului, mai întâi prin reglaj grosier și apoi prin reglaj fin, până când culoarea filamentului se estompează în imaginea benzii de nichelină (BN)
- se citește indicația miliampermetrului
- cu ajutorul scării I de temperaturi (de pe scara de etalonare) fixată pe panou se face corespondența în °C.

Pentru a face o nouă determinare de temperatură, se deplasează cursorul reostatului la o altă valoare a intensității curentului electric cuprinsă între 15A și 20A, apoi fazele se repetă.

În prezentarea teoretică de la punctul **D** s-a arătat că un termocuplu poate fi întrebuințat pentru determinarea temperaturii numai după ce a fost făcută o etalonare prealabilă a sa. Această etalonare se materializează prin trasarea graficului tensiunii electromotoare induse în funcție de diferența de temperatură între sudura caldă și rece a termocuplului,  $\Delta T$  [°C].

- În cadrul lucrării de laborator se face etalonarea unui termocuplu Cu - Ct
- se închide întrerupătorul **I<sub>2</sub>**. În acest fel rezistența **R<sub>2</sub>** de încălzire a uleiului este cuplată la sursa de alimentare.
  - se citesc indicațiile termometrelor **T<sub>1</sub>** (SR) și **T<sub>2</sub>** (SC), cât și cele ale galvanometrului **G** și ale aparatului înregistrator **Ai**.
  - se va roti mânerul agitatorului **Ag** pentru uniformizarea temperaturii uleiului. Citirile vor fi făcute din 5 în 5 °C corespunzătoare termometrului sudurii calde **T<sub>2</sub>**.
  - se va menține cuplat întrerupătorul **I<sub>2</sub>** până când termometrul **T<sub>2</sub>** va indica o temperatură de 140 °C, fără a depăși această temperatură.
  - se va decupla apoi întrerupătorul **I<sub>2</sub>** și se vor face aceleași citiri și la răcire.

## Date experimentale

În cadrul metodei pirometrului optic se vor efectua 5 determinări ale temperaturii benzii de nichelină, iar rezultatele se vor trece într-un tabel.

*Tabel 1. Date experimentale – pirometru optic*

Nr. crt.	Indicația ampermetrului	Indicația miliampermetrului	Temperatura
1			
2			
3			
4			
5			

În cadrul metodei de determinare a temperaturii cu ajutorul termocuplului, se vor trasa curbele de etalonare a termocuplului, atât pentru galvanometru cât și pentru aparatul înregistrator. Datele obținute se vor tabela.

*Tabel 2. Date experimentale – termocuplu*

Nr. crt.	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	$\Delta T = T_1 - T_2$	Indicația galvanometrului	Indicația aparatului înregistrator
1					
2					
⋮					

## PARTEA A III-A

### **Determinarea răspunsului tranzitoriu al termocuplului**

În această lucrare de laborator, se vor prezenta elementele generale de teoria răspunsului tranzitoriu al instrumentelor în general, respectiv noțiunile fundamentale ale performanțelor termocupurilor. Studenții au posibilitatea de a experimenta construirea și testarea celui mai simplu instrument de măsurare a temperaturii, termocuplul.

Multe sisteme electrice, mecanice și termice pot fi modelate cu ajutorul ecuațiilor diferențiale de ordinul I. Vom aplica această procedură de modelare pentru a studia comportamentul unui astfel de sistem, adică răspunsul tranzitoriu a unui termocuplu.

### **Sisteme de ordinul I. Răspunsul la un semnal tip treaptă**

Un sistem de ordinul I cu un grad de libertate poate fi descris cu ajutorul unei ecuații diferențiale ordinare de ordinul I de forma:

$$a_1 \cdot \frac{dy}{dt} + a_0 \cdot y = F_{(t)} \quad (1)$$

unde  $y_{(t)}$  reprezintă răspunsul sistemului (date de ieșire, output) atunci când este supus unei forțe perturbatoare,  $F_{(t)}$  (date de intrare, input).

Dacă forța perturbatoare se aplică instantaneu la momentul inițial,  $t = 0$ ,

$$F_{(t)} = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ M & t \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

cu condiția inițială  $y_{(0)} = 0$ . Soluția ecuației diferențiale ordinare pentru un astfel de semnal tip treaptă este:

$$y_{(t)} = kM \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (3)$$

Răspunsul sistemului se apropie exponențial de valoarea finală  $y_{\infty} = kM$ . Utilizând condiția inițială, ecuația de mai sus devine:

$$\frac{y(t) - y_{\infty}}{y(0) - y_{\infty}} = e^{-t/\tau} = \frac{y(t) - kM}{-kM} \quad (4)$$

Reprezentarea grafică a răspunsului sistemului arată că pentru anumiți multipli ai constantei de timp  $\tau$  se ating următoarele praguri din valoarea finală: 63,2% pentru  $t = \tau$ , 86,5% pentru  $t = 2\tau$ , 95% pentru  $t = 3\tau$  și 99,3% pentru  $t = 5\tau$ .

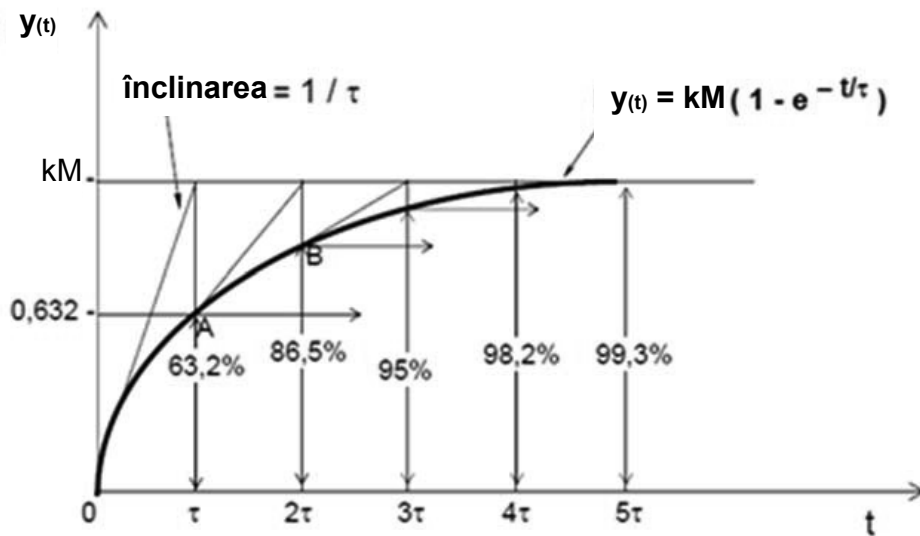


Fig. 1. Răspunsul sistemului de ordin I la un semnal tip treaptă

Constanta de timp a sistemului se determină prin măsurarea răspunsului utilizând regresia liniară:

$$-\frac{t}{\tau} = \ln\left(\frac{y(t) - y_{\infty}}{y(0) - y_{\infty}}\right) = \ln\left(\frac{y(t) - kM}{-kM}\right) \quad (5)$$

Încalinarea (panta),  $s$ , a curbei de răspuns a sistemului este cuplată de constanta de timp prin relația:

$$s = -\frac{1}{\tau} \quad (6)$$



## Răspunsul tranzitoriu al unui termocuplu

Răspunsul dinamic al unui senzor reprezintă de foarte multe ori un factor determinant în proiectarea unui sistem de măsurare. Un senzor de temperatură, precum termocuplul, poate fi modelat cu ajutorul unui sistem de ordinul I. Când termocuplul este supus unei modificări bruște de temperatură, îi va lua ceva timp să răspundă. Dacă timpul de răspuns este mare comparativ cu rata de modificare a temperaturii ce trebuie măsurată, atunci termocuplul nu va putea reda fidel răspunsul sistemului la variațiile / fluctuațiile de temperatură.

O variantă pentru modelarea răspunsului unui termocuplu se bazează pe o analiză simplă a transferului de căldură. Rata (viteza de variație) de schimb de căldură dintre senzor și mediul înconjurător trebuie să fie egală cu rata de modificare a energiei interne a senzorului. Dacă mecanismul dominant de transfer de căldură este convecția (în condițiile în care conducția și radiația sunt considerate neglijabile), atunci bilanțul energetic aplicat unui termocuplu se reduce la:

$$\dot{E}_i - \dot{E}_e + \dot{E}_{gen} = \dot{E}_{st} \quad \Rightarrow \quad -\dot{E}_e = \dot{E}_{st} \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{conv} = \dot{E}_{st} \quad \Rightarrow \quad \alpha A (T_\infty - T) = mc_p \frac{dT}{dt} \quad (8)$$

unde  $\alpha$  este coeficientul convectiv de transfer de căldură,  $A$  este aria suprafeței senzorului,  $T$  este temperatura, iar  $m$  și  $c_p$  reprezintă masa, respectiv căldura specifică a termocuplului.

Dacă se rescrie această ecuație sub forma unei ecuații diferențiale de ordinul I, se obține:

$$\tau \cdot \frac{dT}{dt} + T = T_\infty \quad (9)$$

în care constanta de timp este:

$$\tau = \frac{mc_p}{\alpha A} \quad (10)$$

Dacă se consideră că joncțiunea unui termocuplu poate fi idealizată ca o sferă cu diametrul  $D$ , constanta de timp devine succesiv:

$$\tau = \frac{mc_p}{\alpha A} = \frac{\rho c_p V}{\alpha A} = \frac{\rho c_p \frac{4}{3}\pi r^3}{\alpha 4\pi r^2} = \frac{\rho c_p r}{3\alpha} \quad (11)$$

Adică

$$\tau = \frac{\rho c_p D}{6\alpha} \quad (12)$$

## Utilizarea osciloscopului

Pentru monitorizarea indicațiilor oferite de termocuplu, în cadrul acestei lucrări de laborator se va utiliza un osciloscop Tektronix TDS3054.

Pentru familiarizare modul de utilizare ale acestui instrument, sunt prezentate în continuare caracteristicile și funcțiile sale.

Tektronix TDS3054 Digital Phosphor Oscilloscope este un instrument de monitorizare și înregistrare a semnalelor electrice, utilizat pentru proiectarea și depanarea circuitelor electrice, instalări și mentenanță ale instalațiilor video, pentru testări de etalonare, de producție sau telecomunicații, pentru scopuri educative și de pregătire.



*Fig. 2. Osciloscop digital Tektronix*

Acest osciloscop are câteva caracteristici performante: lățime de bandă de 500 MHz, 4 canale, frecvența de citire 5.0 GS/s, 10000 de valori înregistrate. Panelul frontal permite cuplarea unor probe specializate, reglaje individuale pentru fiecare dintre cele 4 canale, cât și modulul specializat pentru analiza FFT (transformata Fourier). Ecranul color permite vizualizarea simultană a tuturor semnalelor de la cele 4 canale, o interfață ușor de utilizat și redă informațiile în mai multe limbi.

Pentru familiarizarea cu funcționarea osciloscopului Tektronix TDS3054 se va utiliza următoarea procedură:

- identificați elementele din meniurile de pe panoul frontal
- plasați o dischetă în osciloscop
- localizați butonul de pornire (ON) și apăsați-l
- identificați elementele din meniurile afișate
- apăsați butonul STOP și apoi YES pentru a reveni la funcționarea normală a osciloscopului
- apăsați butonul DISPLAY și familiarizați-vă cu opțiunile afișate. Pentru a șterge acest meniu de pe ecran, apăsați butonul MENU OFF
- analizați opțiunile de control din meniul VERTICAL. Folosiți butoanele Scale, Position și Menu pentru a efectua câteva setări diferite. Pentru a șterge acest meniu de pe ecran, apăsați butonul MENU OFF
- analizați opțiunile de control din meniul HORIZONTAL. Folosiți butoanele Scale, Position, Delay, Menu și Magnification pentru a efectua câteva setări diferite. Pentru a șterge acest meniu de pe ecran, apăsați butonul MENU OFF
- analizați opțiunile pentru TRIGGER (startul înregistrării)
- analizați opțiunile din meniul ACQUIRE (achiziție) și testați diferite setări în conexiune cu meniul butonului SAVE/RECALL
- observați opțiunile din meniurile MEASURE, CURSORS și QUICKMENU. Pentru a șterge acest meniu de pe ecran, apăsați butonul MENU OFF
- apăsați butonul de lângă floppy drive pentru a scoate discheta.

În acest punct, ar trebui să puteți vizualiza un semnal pe ecran. Dacă nu, încercați să rotiți butonul pentru poziționare verticală. Dacă tot nu reușiți, cereți ajutorul instructorului.

După obținerea unui semnal pe ecran, se centrează semnalul pe verticală și apoi se conectează proba folosind canalul 1.

Se ajustează rezoluția verticală la 1 V/div și cea orizontală la 200  $\mu$ s/div. Se rotește butonul „Vertical SCALE” până la 10 mV/Div și se observă zgomotul de fond. Se rotește butonul „Horizontal SCALE” pentru diverse setări și se observă modificările în reprezentarea semnalului.

## **Instalația experimentală**

Pentru construirea unui termocuplu, tăiați o bucată de cablu bifilar din rolă, desprindeți cele două fire pe o distanță de circa 3-4 cm.

Îndepărtați izolația de pe fire pe o lungime de circa 2 cm. Răsuciți capetele metalice ale firelor cât mai strâns posibil (pentru a nu crea joncțiuni suplimentare) și tăiați capetele în exces. Lipiți (sudați) joncțiunea.

Repetati procedura și la celălalt capăt al termocuplului. Acum aveți cel mai simplu instrument de măsură a temperaturii.

Instalația experimentală cuprinde termocuplul, osciloscopul, un recipient cu un amestec de apă cu gheață și un dispozitiv pentru încălzire.

Teoretic, recipientul de apă cu gheață va reprezenta temperatura de referință, 0 °C. Poate fi utilizat și pentru verificarea / etalonarea termocuplului.

Pentru determinarea constantei de timp (răspunsul tranzitoriu), se va înregistra pe ecranul osciloscopului curba de variație în timp a temperaturii indicate de termocuplu și se va estima panta acestei curbe de răcire, adică se determină „90% fall time”: cu ajutorul cursorilor active se stabilește valoarea maximă (100%) a diferenței de temperatură, se scad 10% din ambele părți (maxim și minim) și se determină intervalul de timp între cele două puncte (10%-90%, adică  $t_{fall}$  în figura următoare).

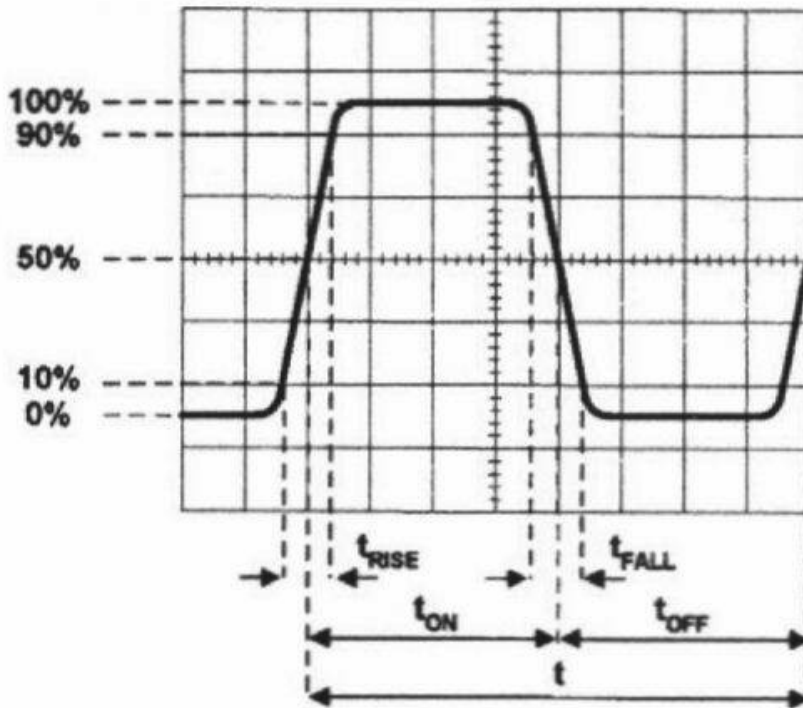


Fig. 3. Captură ecran osciloscop – semnal tip treaptă

## Modul de lucru

Se cuplează termocuplul la conectorul BNC: firul cu izolația galbenă cu dungă roșie la borna neagră (împământare), iar celălalt fir la borna roșie.

Se efectuează următoarele setări la osciloscop: DC coupling, 20 MHz bandwidth, vertical scale 1 mV/Div, și horizontal scale 100 ms/Div (Roll Mode). Pe ecranul osciloscopului ar trebui să obțineți un semnal continuu (dar afectat de zgomotul de fond).

Se scufundă sudura caldă (joncțiunea de măsurare) în amestecul de apă cu gheață și se re poziționează semnalul pe ecranul osciloscopului pe una din liniile din treimea inferioară.

Se scoate joncțiunea din recipientul cu amestec de apă cu gheață și se încălzește până ce semnalul ajunge în dreptul unei linii din treimea superioară a ecranului osciloscopului.

Joncțiunea încălzită se introduce brusc înapoi în amestecul de apă cu gheață și **simultan** se apasă butonul RUN/STOP.

Se activează cursoarele verticale și se determină 100% din amplitudinea semnalului și apoi se determină punctele de 10%, respectiv 90%. Se activează cursoarele orizontale și se determină intervalul de timp între cele două puncte.

Se determină panta curbei de răcire, respectiv constanta de timp a procesului de răspuns tranzitoriu al termocuplului.

Se repetă procedura de 2-3 ori pentru verificarea rezultatului.

De sudura caldă se poate lipi o masă de cupru, ceea ce va mări considerabil masa joncțiunii și deci va crește timpul de răspuns. Aceasta se poate determina practic, repetând procedura de mai sus și pentru acest nou termocuplu.

Datele stocate în osciloscop pot fi salvate pe dischetă și prelucrate ulterior într-un grafic în MS Excel.

## DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A COEFICIENTULUI ADIABATIC

### Generalități

Coeficientul adiabatic al unui gaz se definește prin raportul dintre căldura specifică la presiune constantă și cea la volum constant:

$$k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_{pM}}{c_{vM}} = \frac{c'_p}{c'_v} \quad (1)$$

- $c_{pM}$  și  $c_{vM}$  - căldurile specifice molare la presiune constantă și volum constant în J/kmol · grd ;
- $c'_p$  și  $c'_v$  - călduri specifice volumice [ J/m<sup>3</sup> · grd ] la  $p = \text{ct.}$  și  $v = \text{ct.}$

Întrucât la gazele reale căldurile specifice sunt funcție de presiune și temperatură, rezultă că:

$$k \equiv k(p, T) \quad (2)$$

La gazele semi-perfecte se consideră că aceste călduri specifice sunt funcție numai de temperatură, deci coeficientul adiabatic:

$$k \equiv k(T) \quad (3)$$

Legea de variație  $k \equiv k(T)$  se exprimă prin relația:

$$k \equiv 1 + \frac{R}{c_v} \quad (4)$$

Această lege de variație (4) este dedusă pe baza definiției coeficientului adiabatic (1) și a legii lui Robert-Mayer

$$c_p - c_v = R \quad (5)$$

Deoarece căldurile specifice ale gazelor cresc lent cu temperatura după o lege reprezentată destul de corect de relația:

$$c = A \cdot t + B \cdot T^2 \quad (6)$$

Rezultă că exponentul adiabatic scade cu temperatura și variația sa este mai lentă decât a căldurilor specifice. Din această cauză, pentru variații relativ mici de temperatură, se consideră că și pentru gazele semi-perfecte coeficientul adiabatic este:

$$k = \frac{c_p}{c_v} \cong \text{const} \quad (7)$$

Pentru gaze semi-perfecte, ( $c_v$ ) și ( $c_p$ ) se determină în funcție de energia internă și entalpia gazului pe baza relației:

$$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = \frac{dU}{dT} \quad (8)$$

$$c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_{pv} = \frac{dh}{dt} \quad (9)$$

în care:

$$u = u(T) \quad (10)$$

$$h = h(T) \quad (11)$$

Valoarea lui  $k$  poate fi determinată prin diverse experiențe directe, dintre care cea mai cunoscută este cea elaborată de Clément și Desormes. În lucrare se prezintă instalația și metodică experimentală de determinare a exponentului adiabatic, pe principiul mai sus menționat.



## Conșiderații teoretice privind principiul metodei Clément-Desormes

Un gaz perfect poate suferi o succesiune de transformări simple, plecând de la o stare inițială dată, cu revenire la starea inițială (fig.1).

Practic, pentru determinarea exponentului adiabatic este suficient să se considere numai 2 transformări din succesiunea prezentată mai jos, de exemplu destinderea adiabatică 3 – 4 și încălzirea izocoră 4 – 5.

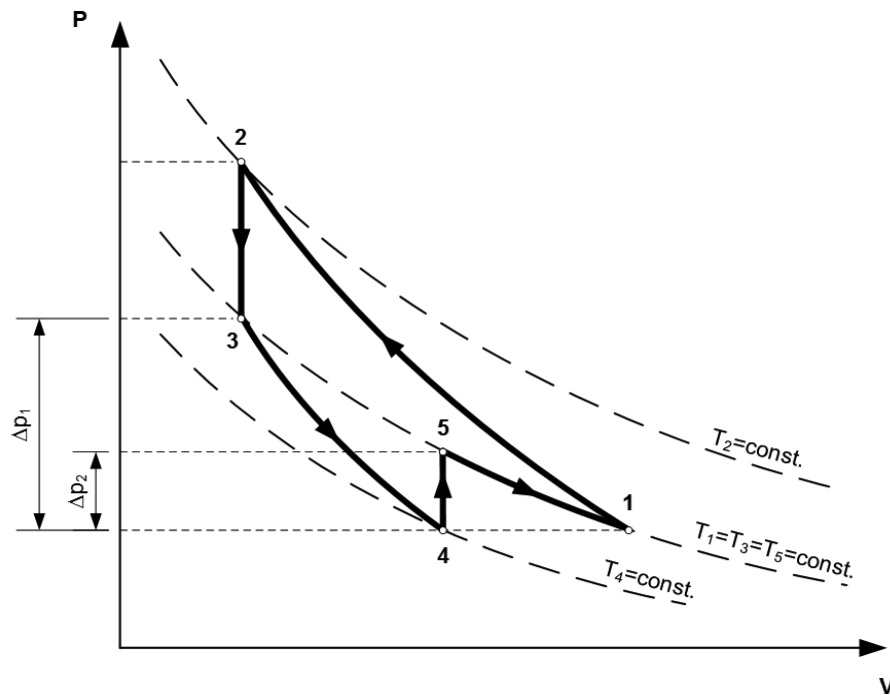


Fig. 1. Ciclul de transformări simple reprezentate în diagrama p-v

Presupunând că aceste transformări au un caracter reversibil și că gazul are proprietățile gazului perfect, putem scrie:

- pentru destinderea adiabatică: 3 – 4

$$\frac{T_3}{p_3 \frac{k-1}{k}} = \frac{T_4}{p_4 \frac{k-1}{k}} \quad (12)$$

adică 
$$\frac{T_3}{T_4} = \left( \frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

sau pentru că  $T_3 = T_1$  și  $p_4 = p_1$

$$\frac{T_1}{T_4} = \left( \frac{p_3}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (13)$$

- pentru încălzirea izocoră 4 – 5

$$\frac{T_5}{T_4} = \left( \frac{p_5}{p_4} \right) \quad (14)$$

sau pentru că  $T_5 = T_1$

$$\frac{T_1}{T_4} = \left( \frac{p_5}{p_4} \right) \quad (15)$$

Din relațiile (13) și (15) rezultă:

$$\left( \frac{p_3}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{p_5}{p_4} \quad (16)$$

sau

$$\frac{p_3}{p_4} = \left( \frac{p_5}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (17)$$

Relația se mai poate scrie:

$$1 + \frac{p_3 - p_1}{p_1} = \left( 1 + \frac{p_5 - p_1}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (18)$$

Notând cu  $p_3 - p_1 = \Delta p_1$  și  $p_5 - p_1 = \Delta p_2$ , relația (17) devine:

$$1 + \frac{\Delta p_2}{p_1} = \left( 1 + \frac{\Delta p_1}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (19)$$

Dezvoltând în serie Taylor și neglijând termenii la puteri superioare (adică,  $\Delta p_1 > \Delta p_2$ ) se obține succesiv:

$$1 + \frac{\Delta p_1}{p_1} = 1 + \frac{k}{k-1} \frac{\Delta p_2}{p_1} \quad \text{sau} \quad \Delta p_1 (k-1) = k \Delta p_2$$

Rezultă: 
$$k = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_1 - \Delta p_2} \quad (20)$$

Expresia este foarte simplă, necesitând numai măsurarea suprapresiunii înaintea destinderii 3 – 4 și după încălzirea izocoră 4 – 5.

## Instalația experimentală

Aparatul pentru determinarea exponentului adiabatic (fig. 2) se compune dintr-un rezervor etanș prevăzut la partea superioară cu 2 robinete, o pompă de comprimarea aerului și un manometru pentru măsurarea diferenței de presiune.

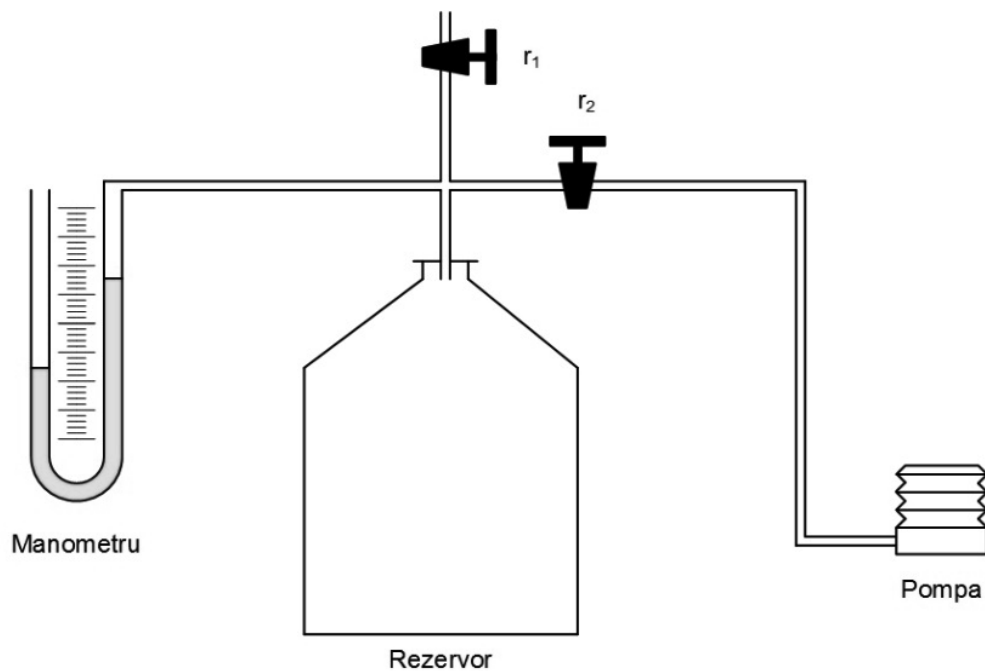


Fig. 2. Schema instalației de laborator

## Modul de lucru

1. La începutul lucrării experimentale, robinetul  $r_1$  va fi deschis pentru a asigura în rezervor aer la starea mediului ambiant ( $p_1$  și  $T_1$ ), presupusă constantă în timpul măsurătorilor (curenții de aer în jurul aparatului, așezarea acestuia în apropierea caloriferului, încălzirea recipientului prin respirație sau atingerea lui cu mâna, pot influența defavorabil rezultatele măsurătorilor).
2. În această situație, lichidul se află la același nivel în cele două brațe ale tubului manometric.
3. Se închide  $r_1$  și se deschide  $r_2$ , punând astfel rezervorul în legătură cu pompa.
4. Se pompează de 4-5 ori până se obține în cele două brațe ale tubului manometric o diferență ( $\Delta p_1$ ) de 50 – 60 mm coloană de lichid.
5. Se închide  $r_2$  și se așteaptă 2-3 minute, până când aerul încălzit prin compresiune revine la temperatura mediului ambiant;  $\Delta p_1$  se micșorează puțin până se stabilizează la o valoare constantă.
6. Se deschide și se închide brusc  $r_1$ , obținându-se în rezervor presiunea inițială  $p_1$ . Se așteaptă iarăși câteva minute, pentru ca gazul răcit prin detentă să revină la temperatura mediului ambiant. În urma încălzirii izocore, presiunea va crește, citindu-se  $\Delta p_2$  (de ordinul a 10 – 20 mm).
7. Se deschide  $r_1$ , aparatul rămânând pregătit pentru o nouă determinare experimentală.
8. Se repetă experimentul de mai multe ori (min. 10 ori) pentru ca erorile de măsură să fie mai mici.

Desfășurarea lucrării este similară și pentru determinarea exponentului adiabatic al altor gaze. În locul pompei se va folosi un rezervor conținând gazul al cărui exponent adiabatic urmează să fie determinat.

## DETERMINAREA PARAMETRILOR ABURULUI SATURAT UMED

### Generalități

Gazele reale aflate în stări termodinamice din apropierea punctului de lichefiere se numesc **vapori**. Vaporii de apă sunt cunoscuți sub denumirea de **abur** și reprezintă un agent termic des folosit în aplicațiile tehnice.

Se numește **temperatură de saturație**, temperatura la care, pentru o anumită presiune, se produce **vaporizarea**, adică transformarea fazei lichide în fază de vapori. În funcție de temperatură se disting fazele de: abur saturat, abur supraîncălzit și abur subrăcit.

**Aburul saturat** este aburul a cărei temperatură este egală cu temperatura de saturație corespunzătoare presiunii la care se găsește. Aburul saturat poate fi uscat sau umed.

- Aburul saturat uscat este aburul din care lipsește complet faza lichidă.
- Aburul saturat umed reprezintă un amestec de abur saturat uscat și picături de apă la temperatura de saturație.
- Aburul subrăcit posedă o temperatură inferioară celei de saturație corespunzătoare presiunii la care se află.
- Aburul supraîncălzit are o temperatură superioară celei de saturație, pentru presiunea respectivă.

Ca și în cazul gazelor, pentru a determina starea vaporilor supraîncălziți sunt necesare valorile a doi parametri de stare (ușor de măsurat, spre exemplu: presiunea și temperatura). Pentru a determina starea vaporilor saturați umezi (ce caracterizează procesul de vaporizare sau condensare) este necesară și o altă mărime de stare, și anume **titlul aburului saturat,  $x$** .

Titlul  $x$  al aburului saturat umed reprezintă participația în masă a vaporilor saturați uscați în vaporii saturați umezi, adică:

$$x = \frac{M_v}{M_v + M_a} \quad (1)$$

unde:

$M_v$  – masa vaporilor saturați uscați din amestec

$M_a$  – masa apei (lichidului) din amestec

În diagramele (p-v), (T-s) și (h-s) domeniul de stare a aburului umed este despărțit prin curbe limită de domeniul lichidului, respectiv de cel al aburului supraîncălzit. Stările aburului saturat uscat ( $M_a = 0$ ) sunt reprezentate prin **curba limită superioară** pentru care titlul aburului este  $x = 1$ , iar stările lichidului aflat în starea de saturație (de fierbere) prin **curba limită inferioară** ( $M_v = 0$ ) pentru care titlul aburului este  $x = 0$ .

Ambele curbe se intersectează în punctul critic.

În interiorul acestui domeniu titlul aburului este  $0 < x < 1$ .

De asemenea,

$$y = 1 - x = \frac{M_a}{M_a + M_v} \quad (2)$$

reprezintă umiditatea vaporilor.

Fiind cunoscută starea vaporilor, toate celelalte mărimi de stare (volumul specific  $v$ , entalpia  $h$ , entropia  $s$ , energia internă  $u$ ) se pot determina :

a – cu ajutorul diagramei h-s

b – cu ajutorul tabelelor corespunzătoare prin citire directă

c – cu ajutorul relațiilor cunoscute ale lui  $v$ ,  $h$ ,  $s$ ,  $u$ , care sunt funcție de  $p$  sau  $T$  și  $R$ .

## Scopul lucrării

Lucrarea de față își propune determinarea parametrilor aburului saturat umed, punctul de stare fiind caracterizat cu ajutorul titlului acestuia.

Titlul aburului se poate determina prin mai multe metode din care se remarcă:

- a – metoda cu calorimetrul de trecere
- b – metoda cu calorimetrul cu laminare (ștrangulare).

În această lucrare de laborator este folosită metoda cu calorimetrul cu laminare pentru determinarea titlului aburului.

## Instalația experimentală

Aburul saturat umed produs în centrala termică este adus în calorimetrul (C) printr-un orificiu de laminare (S), în care, datorită reducerii secțiunii, suferă o laminare (fenomen ce are loc la entalpie constantă).

În acest proces, presiunea aburului scade brusc având loc o vaporizare a umidității și o supraîncălzire a aburului.

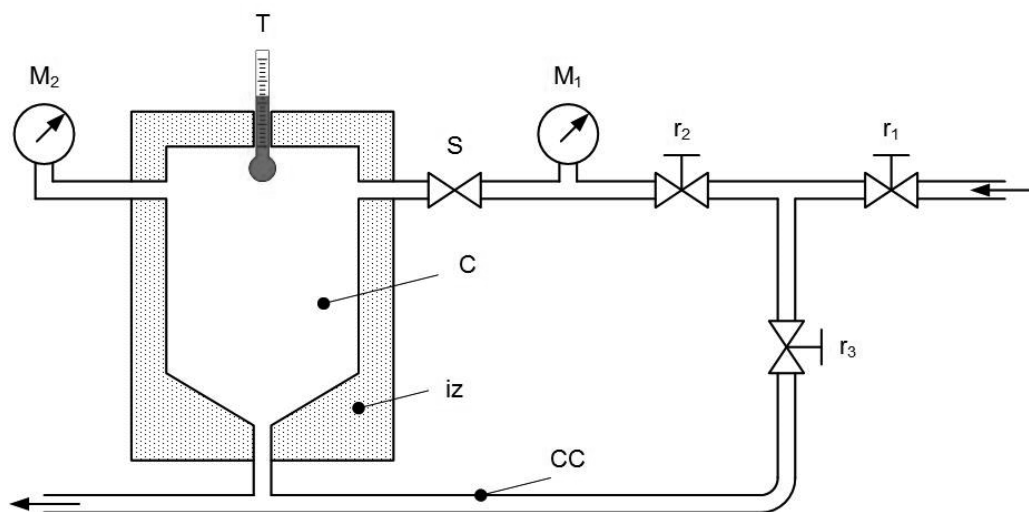


Fig. 1. Schema instalației de laborator

Măsurând presiunea  $p_1$  a aburului saturat umed înainte de laminarea sa cu manometrul ( $M_1$ ), precum și temperatura  $T_2$  și presiunea  $p_2$  ale aburului supraîncălzit din calorimetru la sfârșitul procesului de laminare cu termometrul (T) respectiv cu manometrul ( $M_2$ ), se pot determina parametri inițiali ai aburului și deci titlul aburului saturat umed pe cale grafică sau analitică.

Celelalte notații din fig. 1 sunt:

- $r_1$  – robinet de admisie a aburului în instalație
- $r_2$  – robinet pentru admisia și reglarea presiunii aburului la intrarea în dispozitivul de laminare;
- $r_3$  – robinet pentru evacuarea condensului de pe conducta de admisie
- CC – conducta de condens;
- iz – izolație.

### Determinarea parametrilor aburului saturat umed

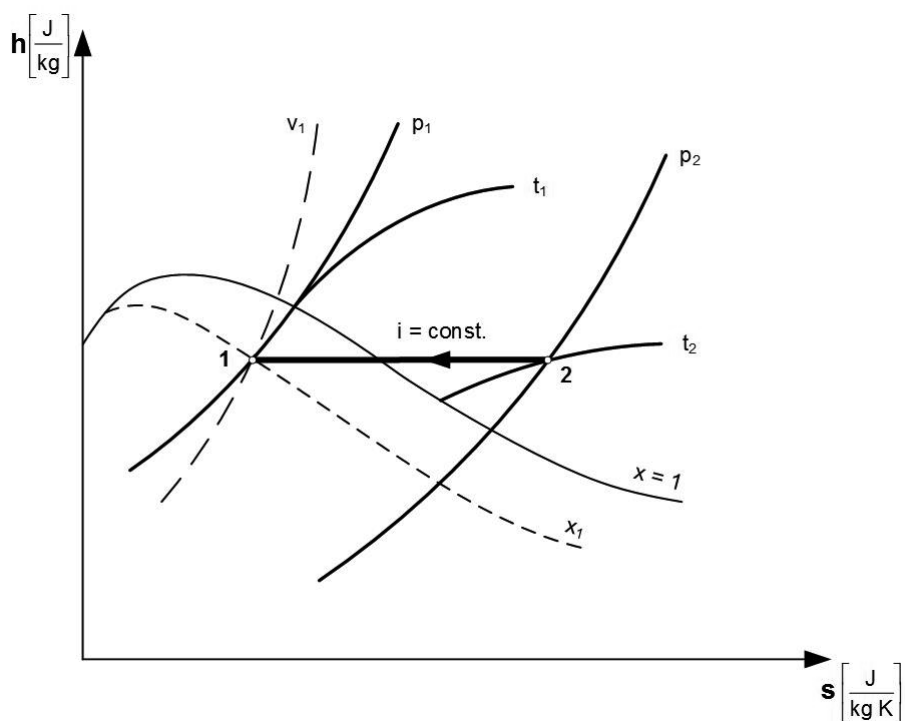


Fig. 2. Reprezentarea modului de lucru în diagrama h-s



În fig. 2 este indicat modul de determinare a parametrilor aburului cu ajutorul diagramei h-s.

Se determină punctul (2) corespunzător presiunii  $p_2$  și temperaturii  $T_2$  a aburului supraîncălzit din calorimetru. Din punctul (2) se duce o dreaptă paralelă cu abscisa (dreaptă de  $h = \text{constant}$  ce reprezintă procesul de laminare), până la intersecția cu izobara aburului saturat umed ( $p_1 = \text{constant}$ ), determinându-se astfel punctul (1). Acesta reprezintă punctul de stare a aburului saturat umed înaintea procesului de laminare.

Curba de titlu constant,  $x_1$  ce trece prin punctul (1) indică titlul aburului saturat umed. Se determină apoi din diagramă valorile celorlalți parametri ce corespund celor două puncte și anume: volumul specific, entalpia și entropia .

Temperatura  $T_1$  corespunzătoare punctului (1) este redată de izoterma  $T_1$  ce trece prin punctul aflat la intersecția dintre izobara  $p_1$  și curba limită superioară ( $x = 1$ ) .

Energia internă a aburului se determină cu relația:

$$u = h - p \cdot v, \quad \left[ \frac{J}{Kg} \right]$$

## Modul de lucru

- 1 – Se deschide treptat robinetul ( $r_1$ ) și apoi robinetul ( $r_3$ ) pentru a elimina aerul și condensul de pe conducta de admisie.
- 2 – Se închide robinetul ( $r_3$ ) deschizându-se apoi treptat robinetul de reglaj ( $r_2$ ) .
- 3 – Se așteaptă ca sistemul să intre în regim termic staționar, adică termometrul (T) indică o temperatură stabilă.
- 4 – Se citesc indicațiile aparatului și se notează în tabelul cu rezultate experimentale (tab.1).
- 5 – Se închide robinetul ( $r_2$ ) .
- 6 – Se repetă determinarea în ordinea expusă.

- 7 – La sfârșitul determinărilor se închid cele trei robinete în ordinea (r<sub>2</sub>), (r<sub>1</sub>), (r<sub>3</sub>).
- 8 – Se determină parametrii aburului corespunzător punctului (1) și (2) de pe diagrama h-s și se trec valorile lor în tabelul cu rezultate experimentale.

## Date experimentale

Se centralizează datele obținute într-un tabel după modelul de mai jos :

*Tabel 1. Date experimentale*

Nr. crt.	$p_1$ N/m <sup>2</sup>	$T_1$ °C	$s_1$ J/kgK	$v_1$ m <sup>3</sup> /kg	$u_1$ J/kg	$x_1$	$p_2$ N/m <sup>2</sup>	$T_2$ °C	$s_2$ J/kgK	$v_2$ m <sup>3</sup> /kg	$u_2$ J/kg
1											
2											
3											
...											

## DETERMINAREA UMIDITĂȚII AERULUI

### Generalități

Aerul atmosferic uscat este un amestec mecanic de mai multe gaze, dintre care unele se găsesc în cantități neglijabile. Cele patru elemente de bază care intră în componența aerului atmosferic uscat sunt: azotul, oxigenul, argonul și bioxidul de carbon.

Aerul atmosferic este întotdeauna încărcat cu vapori de apă, formând **aerul umed**.

Parametrii principali ai aerului umed sunt: presiunea, temperatura, umiditatea, căldura specifică și entalpia.

În cele ce urmează se vor nota cu indicele “*a*” parametri ce corespund aerului uscat, cu indicele “*v*” parametri ce corespund vaporilor de apă și cu indicele “*u*” sau fără indice, parametri ce corespund aerului umed.

#### *Presiunea.*

Considerând aerul atmosferic ca fiind un amestec de aer uscat și vapori de apă, presiunea atmosferică sau barometrică reprezintă după legea lui Dalton suma presiunilor parțiale a acestor componente, adică:

$$p = p_u = p_a + p_v, \quad \left[ \frac{N}{m^2} \right] \quad (1)$$

#### *Temperatura.*

Temperatura aerului umed măsurată cu un termometru obișnuit poartă numele de temperatura termometrului uscat și se notează cu “*T*”.

Temperatura indicată de un termometru al cărui rezervor este înfășurat într-o țesătură îmbibată cu apă este definită ca temperatura termometrului umed notată cu “  $T$  ”. Această temperatură este mai mică decât cea a termometrului uscat, deoarece pentru evaporarea apei de la suprafața țesăturii este necesară căldura latentă de vaporizare, absorbită de la rezervorul termometrului.

Temperatura punctului de rouă “  $\tau_r$  ” reprezintă temperatura la care apar primele picături de apă prin răcirea aerului sau pe o suprafață rece cu care vine în contact, aerul umed.

### *Umiditatea aerului*

Prin umiditatea aerului se înțelege în general cantitatea de vapori de apă ce este conținută în unitatea de masă a unui volum de aer.

- a. Umiditatea absolută a aerului “  $a$  ” este cantitatea de vapori de apă exprimată în grame sau în kilograme conținută într-un metru cub de aer umed, adică:

$$a = \frac{M_v}{V_u}, \left[ \frac{\text{kg vapori de apă}}{\text{m}^3 \text{ aer umed}} \right] \quad (2)$$

Dacă aerul umed este saturat, atunci se definește într-un mod similar umiditatea absolută maximă:

$$a_s = \frac{M_{vs}}{V_u}, \left[ \frac{\text{kg vapori de apă saturați}}{\text{m}^3 \text{ aer umed}} \right] \quad (3)$$

Aici indicele “ $s$ ” se referă la vapori de apă în stare de saturație.

- b. Umiditatea relativă “  $\varphi$  ” a aerului se definește prin raportul dintre umiditatea absolută și umiditatea absolută maximă, adică:

$$\varphi = \frac{a}{a_s} = \frac{M_v}{M_{vs}} = \frac{p_v}{p_{vs}} \quad (4)$$

unde  $p_v$  și  $p_{vs}$  sunt presiunile parțiale ale vaporilor de apă din aerul nesaturat și saturat cu acești vapori.

- c. Conținutul de umiditate “ $x$ ” reprezintă cantitatea de vapori de apă (grame sau kilograme) ce revine unui kilogram de aer uscat.

$$x = \frac{M_v}{M_a}, \left[ \frac{\text{Kg vapori de apă}}{\text{kg aer uscat}} \right] \quad (5)$$

În mod analog se definește conținutul maxim de umiditate ca raportul:

$$x_s = \frac{M_{vs}}{M_a}, \left[ \frac{\text{Kg vapori de apă saturați}}{\text{kg aer uscat}} \right] \quad (6)$$

## Metode și aparate de măsură

Aparatele care măsoară direct sau indirect umiditatea aerului se numesc **higrometre**. Ele pot fi:

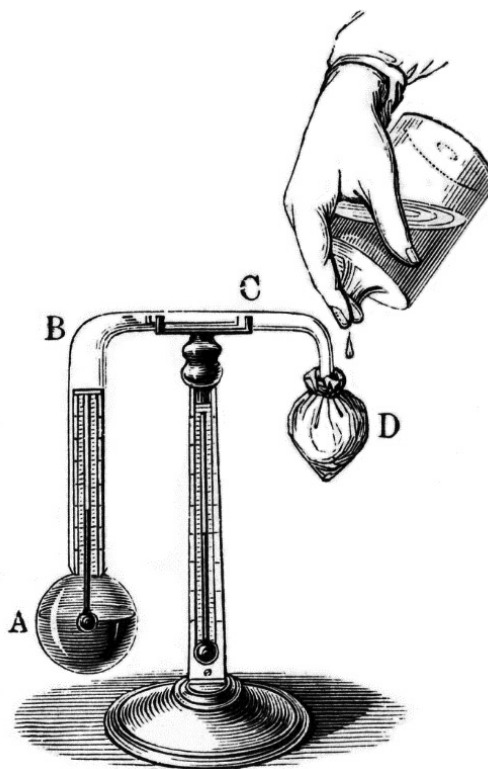
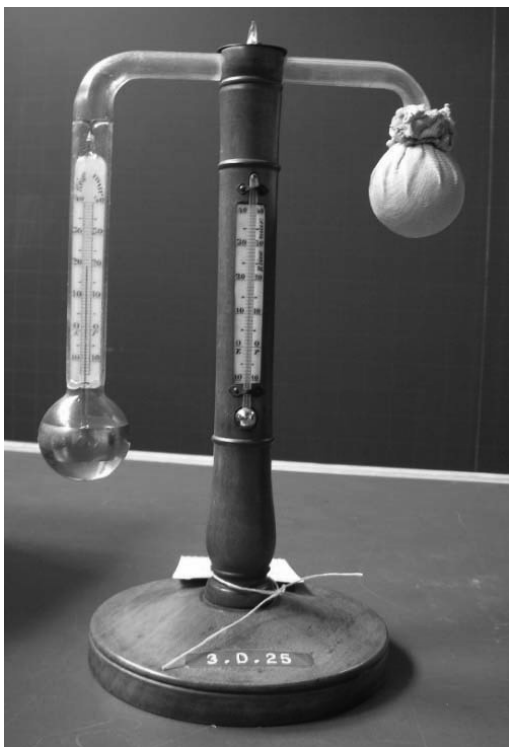
- higrometre indicatoare (higrometre), aparate ce dau indicații numai asupra valorilor momentane.
- higrometre înregistratoare (higrografe) aparate ce înregistrează succesiunea valorilor momentane.
- higrometre indicatoare – înregistratoare, adică aparate ce îndeplinesc ambele funcții.

Pentru determinarea umidității aerului cele mai folosite metode sunt:

1. Metoda absorbției, care determină cantitatea de vapori absorbită de către o substanță higroscopică, prin care a trecut un volum determinat de aer.

Higrometrele care utilizează această metodă se numesc higrometre de absorbție. Cu ajutorul lor se determină umiditatea absolută a aerului “ $a$ ”.

2. Metoda condensării sau a punctului de rouă, prin care se determină temperatura la care, prin răcire la presiune constantă, se declanșează condensarea vaporilor de apă conținuți în aerul umed. Higrometrele ce utilizează această metodă se numesc higrometre de condensare. Cu ajutorul lor se determină direct temperatura punctului de rouă.



*Fig. 1. Higrometrul Daniell*

Un astfel de higrometru este higrometrul Daniell, fig. 1, care se compune dintr-un tub de sticlă ABCD îndoit în formă de U, la extremitățile căruia se află câte un balon. Higrometrul are un termometru interior cu rezervorul în sfera A. Această sferă este argintată în interior pentru a se distinge cu ușurință aburirea.

În sfera A se află eter și vapori de eter care se răspândesc în tot tubul, iar sfera D este învelită într-un material textil. Prin încălzirea sferei D cu mâna, se elimină eterul din sfera D către sfera A. Apoi se picură eter peste tifonul sferei D (în lipsa eterului, se poate utiliza o altă substanță volatilă benzen, benzină, etc). Pentru evaporarea eterului se consumă o cantitate de căldură (căldură latentă de evaporare) care va duce la răcirea rezervorului D și condensarea vaporilor de eter din tub. Se picură în continuare eter pe tifonul sferei D până în momentul când oglinda rezervorului A începe să se aburească. În acel moment, se citește temperatura  $T_1$  din rezervorul A. Această temperatură va reprezenta tocmai temperatura punctului de rouă a aerului atmosferic ce înconjoară aparatul.

Citind și temperatura mediului ambiant se caută în tabele presiunile parțiale ale vaporilor corespunzătoare celor două temperaturi.

Raportul  $\frac{p_v}{p_{vs}}$  ne dă tocmai umiditatea relativă  $\varphi$ .

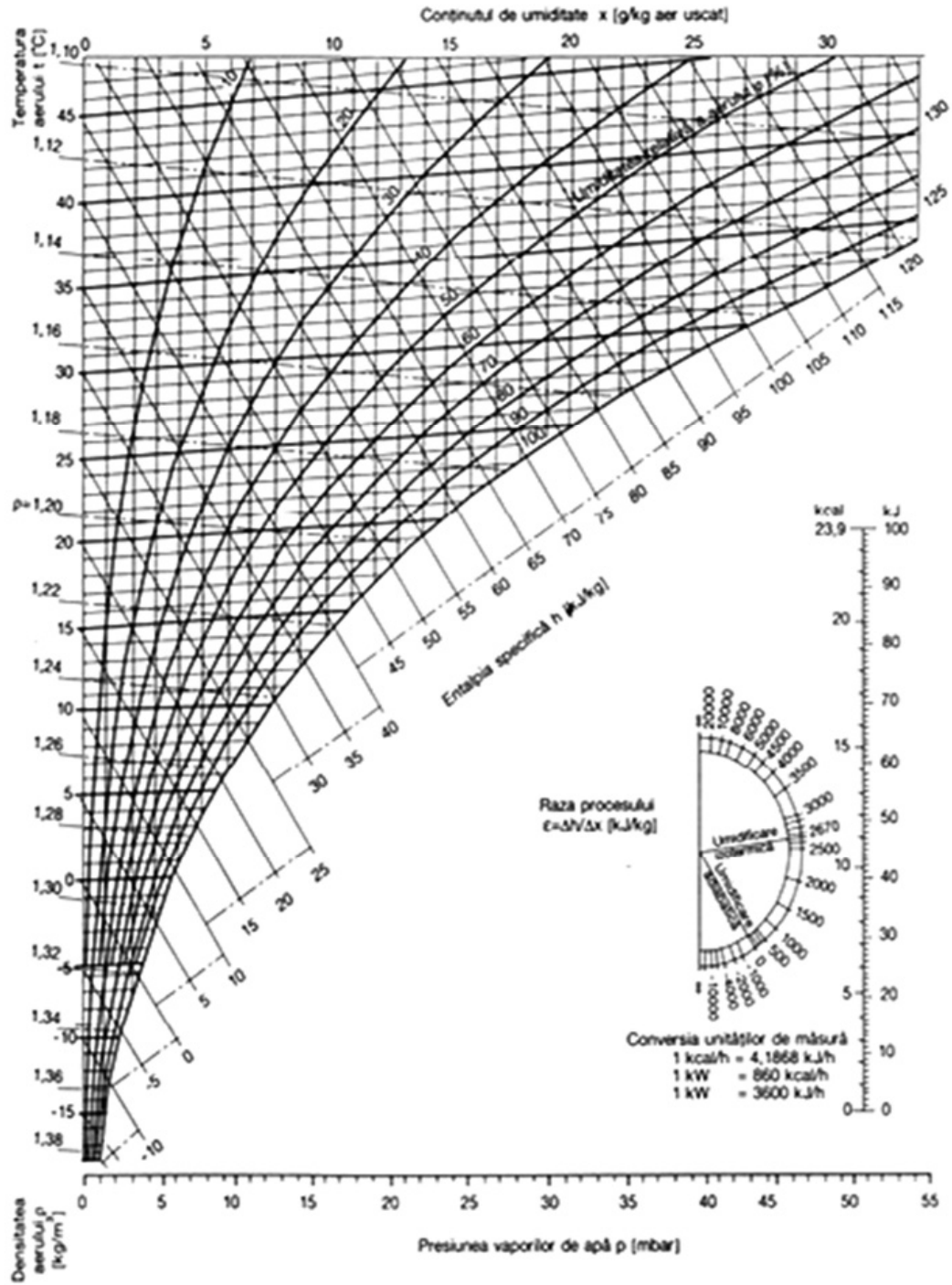


Fig. 2. Diagrama  $h-x$ , pentru aerul umed, la presiunea de 1013 mbar.

Dacă se cunosc cele două temperaturi  $T_1$  și  $\tau_r$  umiditatea relativă se mai poate determina și cu ajutorul diagramei  $h - x$  a aerului umed (fig. 2) și anume:

- știind temperatura punctului de rouă  $\tau_r$  se determină punctul aflat la intersecția acestei izoterme cu curba  $\varphi = 100\%$ .
- din acest punct se ridică o verticală până se intersectează cu linia temperaturii termometrului uscat  $T$ . Acest punct reprezintă starea aerului umed.
- se citesc umiditatea relativă  $\varphi_x$  și ceilalți parametri de stare.

3. Metoda higroscopică se bazează pe higroscopicitatea materialelor de proveniență animală, vegetală sau a unor materiale sintetice; adică pe capacitatea lor de a-și egala umiditatea cu umiditatea mediului ambiant. Odată cu variația umidității, aceste materiale se deformează alungindu-se sau scurtându-se.

Higrometrul cu fir de păr utilizează această metodă cu ajutorul căreia se determină direct umiditatea relativă a aerului.

Această metodă este foarte simplă și rapidă, dar presupune reetalonări periodice întrucât firul de păr capătă cu timpul deformații permanente.

4. Metoda psihrometrică. Această metodă se bazează pe relația ce există între umiditatea relativă a aerului și diferența de temperatură dintre  $T$  și  $T'$  indicate de un termometru uscat și unul umed.

În practica industrială se utilizează frecvent două tipuri de psihometre: August (fig. 3) și Assmann (fig. 4).

**Psihrometrul August** se compune din două termometre identice, dintre care unul are rezervorul descoperit, în aer liber, (termometrul uscat), iar cel de-al doilea termometru are rezervorul înfășurat într-o pânză îmbibată cu apă (termometrul umed).

Pentru evaporarea apei de pe suprafața rezervorului umed se consumă o cantitate de căldură (egală cu căldura latentă de evaporare) care este absorbită de la rezervorul termometrului umed și, în consecință, temperatura indicată de termometrul umed este mai mică decât a celui uscat. Diferența dintre cele două temperaturi se numește *diferență psihrometrică*.



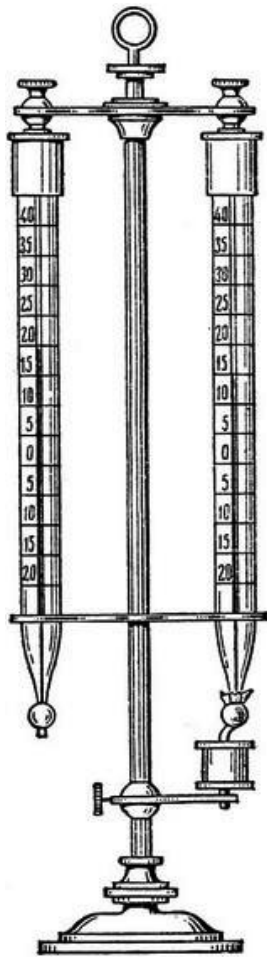


Fig. 3. Psihrometrul August

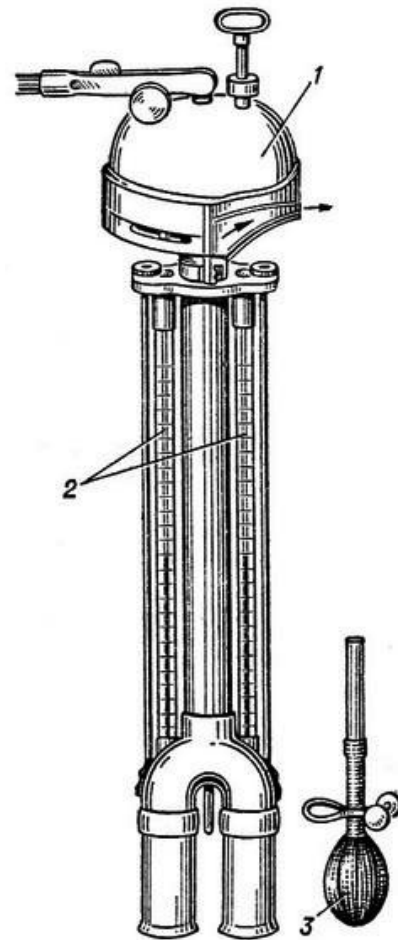


Fig. 4. Psihrometrul Assmann

Deoarece evaporarea este cu atât mai intensă cu cât aerul este mai uscat, diferența psihrometrică va fi mai mare.

În cazul în care aerul este saturat cu vapori de apă, evaporarea de pe suprafața rezervorului nu se va mai produce și în consecință cele două temperaturi vor fi egale.

Efectuând bilanțul energetic la suprafața termometrului umed, se egalează căldura consumată pentru evaporarea unei cantități de apă din materialul de pe suprafața termometrului umed și căldură cedată acestei cantități de apă de către rezervorul termometrului umed.

Rezultă formula psihrometrică:

$$\varphi = \frac{p_v}{p_{vsusc}} \cdot 100 = \frac{p_{vs um} - A(T - T') \cdot B}{p_{vsusc}} \cdot 100 \quad (7)$$

unde:

$p_{vs um}$  și  $p_{vs usc}$  - sunt presiunile parțiale ale vaporilor de apă saturați corespunzătoare temperaturilor termometrului uscat și umed care se iau din tabele.

$B$  - este presiunea barometrică.

$T$  și  $T'$  - sunt temperaturile termometrului uscat și umed.

$A$  - denumit coeficient psihrometric este dat de relația:

$$A = 10^{-5} \left( 65 + \frac{6,75}{w} \right) \quad (8)$$

$w$  - este viteza de deplasare a aerului în dreptul rezervorului termometrului umed, în m/s.

Curba de variație a lui  $A$  funcție de  $w$ .

Din formulă se observă că la viteze mici de deplasare ale aerului coeficientul psihrometric este supus la variații bruște, iar la viteze mai mari curba se apropie asimptotic de valoare constantă:

$$A = 65 \cdot 10^{-6}$$

În consecință, este necesară determinarea vitezei de deplasare a aerului din dreptul rezervorului termometrului umed pentru a determina coeficientul psihrometric, și apoi a umidității relative a aerului.

Ținând seama de variația lui  $A = f(w)$ , evident că la viteze mai mici de deplasare a aerului măsurătorile vor fi mai puțin precise decât la viteze mai mari unde această mărime tinde să capete o valoare stabilă.

Pentru a asigura un curent de aer cu viteză stabilă și ușor măsurabilă la rezervoarele termometrelor, au fost construite psihrometre cu ventilator, precum **psihrometrul de aspirație Assmann** (fig. 4, 5).

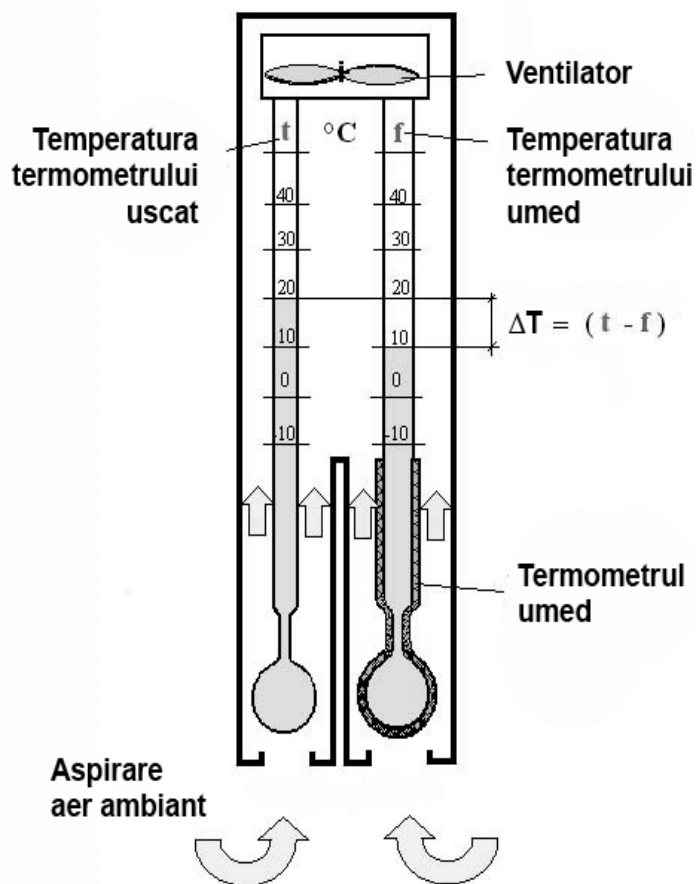


Fig. 5. Psihrometrul Assmann – elemente componente

Ambele rezervoare ale termometrelor sunt introduse în teci metalice de protecție, care sunt montate concentric în tuburi. Între teci și tuburi se formează un strat de aer ce apără rezervoarele termometrelor de acțiunea maselor calorice externe. Tecile comunică cu tubul ce duce aerul la ventilatorul plasat la capătul dispozitivului, ventilatorul fiind pus în mișcare de un resort sau un electromotor.

Ventilatorul aspiră aerul prin teci cu o viteză de circa 2,5 m/s. Unul din rezervoare (de obicei cel din dreapta) este înfășurat într-un manșon de material textil umezit cu apă prin intermediul unei pipete.

Pentru simplificarea calculelor practice se utilizează tabele psihrometrice pentru determinarea umidității relative a aerului,  $\phi$ . Aceste tabele sunt întocmite pentru diferite viteze de deplasare a aerului, respectiv pentru diferitele valori ale lui A. Eroarea este de 0,2 – 1,2% față de valoarea lui  $\phi$  calculată cu ajutorul formulei psihrometrice.

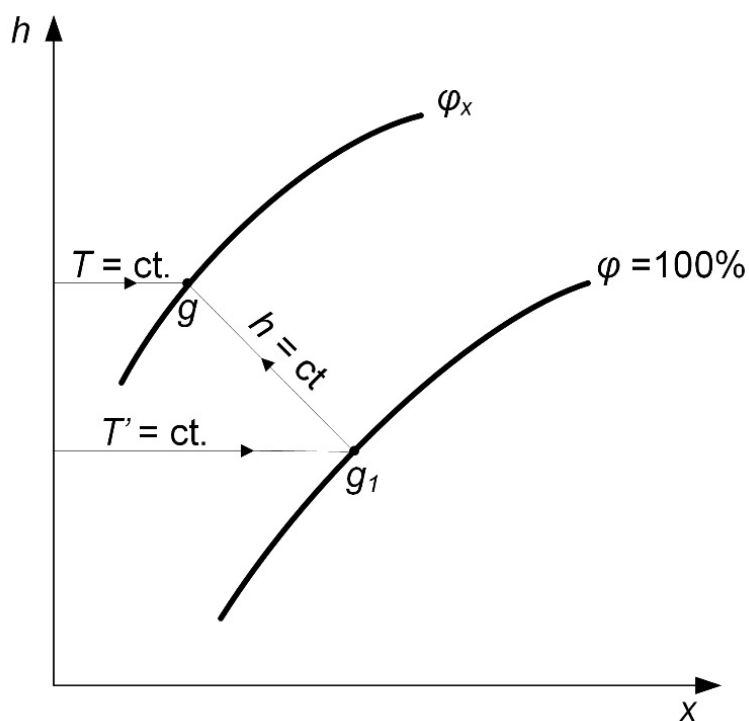


Fig. 6. Determinarea umidității aerului cu ajutorul diagramei  $h-x$

Umiditatea relativă a aerului se poate stabili cu o precizie destul de mare și cu ajutorul diagramei  $h-x$  a aerului umed. În acest scop se presupun cunoscute temperaturile  $T$  și  $T'$  determinate cu ajutorul termometrelor de aspirație.

La o ventilare suficient de puternică a rezervorului termometrului umed, se realizează în jurul suprafeței acesteia un schimb de căldură și de umiditate între aer și apă apropiat de starea de saturație. În consecință, în zona imediat învecinată a rezervorului termometrului umed se va stabili o temperatură a aerului egală cu  $T'$  la  $\varphi = 100\%$ . Această stare se caracterizează în diagrama  $h-x$  prin punctul  $g_1$ .

Întrucât evaporarea apei de pe suprafața rezervorului termometrului umed se realizează la entalpie constantă a aerului, procesul de modificare a stării acestuia va decurge după izoentalpa  $g - g_1$ . Punctul  $g$  de intersecție a acestei linii cu izoterma corespunzătoare temperaturii  $T$  a termometrului uscat caracterizează starea aerului din mediul respectiv.

Cunoscând poziția punctului  $g$  se poate determina ușor valoarea umidității relative  $\varphi$  a aerului din încăpere.

## Modul de lucru

Se va determina umiditatea relativă a aerului cu ajutorul higrometrului Daniell. Apoi se va face aceeași determinare cu ajutorul psihrometrului, folosind relația psihrometrică, tabelele psihrometrice și diagrama  $h-x$  a aerului umed. În cazul psihrometrului, experiența se execută astfel:

- se umezește materialul textil cu ajutorul unei pipete ce conține apă aflată la temperatura încăperii;
- se pornește electromotorul ventilatorului;
- se urmărește variația temperaturii celor două termometre până când se produce o stabilizare a acestora, (circa 4-5 minute de la pornire);
- se repetă experiența de câteva ori;
- se calculează umiditatea relativă a aerului cu ajutorul celor trei metode menționate.

În tabelul 1 se prezintă datele psihrometrice necesare calculului.

Tabel 1. Date psihrometrice

Temp. (°C)	Pres. $P_s$ torr	Termometrul umezit t °C																		Termometrul uscat	
		+10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	t
10°	1228	100																			+10°
11°	1312	88	100																		11
12°	1403	78	89	100																	12
13°	1497	69	79	90	100																13
14°	1600	60	70	79	90	100															14
15°	1705	52	61	71	80	90	100														15
16°	1917	46	54	63	71	81	90	100													16
17°	1937	39	47	55	64	72	81	90	100												17
18°	2064	34	41	49	56	65	73	82	91	100											18
19°	2200	29	36	43	50	58	66	74	82	91	100										19
20°	2339	24	30	37	44	51	59	66	74	83	91	100									20
21°	2487	20	26	32	39	46	53	60	67	75	83	91	100								21
22°	2644	16	22	28	34	40	47	54	61	68	76	84	92	100							22
23°	2804	13	18	24	30	36	42	48	55	62	69	76	84	92	100						23
24°	2981	10	15	20	26	31	37	43	49	56	63	70	77	84	92	100					24
25°	3168	7	12	17	22	27	32	37	42	50	57	63	70	77	84	92	100				25
26°	3361	5	9	14	19	24	29	34	40	46	52	58	64	71	78	85	92	100			26
27°	3565	3	7	11	16	21	25	30	36	41	47	52	58	65	71	78	85	93	100		27
28°	3780	1	5	9	13	18	22	27	32	37	42	48	53	59	65	72	78	85	93	100	28

Presiunea parțială a vaporilor de apă în stare saturată  $P_s$  și umiditatea relativă; valabile pentru presiunea atmosferică de  $p = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ [N/m}^2\text{]}$  la o viteză a aerului de 2,5 m/sec și o valoare a lui  $A = 67,7 \cdot 10^{-5}$

## Rezultatele experimentale

Datele experimentale se centralizează în tabelul de mai jos:

Tabel 2. Date experimentale

Nr crt.	Determinarea umidității relative a aerului										
	Cu higrometrul cu punct de rouă					Cu psihrometrul					
	Temperatura termometrului uscat	Temperatura punctului de rouă	Presiunea parțială a vaporilor	Presiunea parțială a vaporilor saturați	Umiditatea relativă	Presiunea barometrică	Temperatura termometrului uscat	Temperatura termometrului umed	Presiunea parțială a vaporilor	Presiunea parțială a vaporilor saturați	Umiditatea relativă
$T$ °C	$\tau_r$ °C	$p_v$ N/m <sup>2</sup>	$p_{vs.}$ N/m <sup>2</sup>	$\varphi$ %	$p$ N/m <sup>2</sup>	$T$ °C	$T'$ °C	$p_{usc.}$ N/m <sup>2</sup>	$p_{sat}$ N/m <sup>2</sup>	$\varphi$ %	
1											
2											
3											
...											

## EFECTUL JOULE – THOMSON

### Scopul lucrării

Un **proces de laminare** poate genera variațiile următorilor parametri fizici: temperatura -  $T$ , presiunea -  $p$ , viteza -  $w$ , entalpia -  $h$ , energia internă -  $u$ , căldura specifică la presiune constantă -  $C_p$ .

Se stabilește experimental, pentru gaze, dependența de temperatură a parametrilor fizici:  $h$ ,  $u$ ,  $C_p$ .

### Considerații teoretice ale metodei experimentale

Principiul conservării și conversiei energiei pentru o transformare deschisă are forma:

$$\sum L + \sum Q = \Delta E \quad (1)$$

care arată că suma tuturor lucrurilor mecanice și termice schimbate de un sistem termodinamic cu mediul înconjurător, este egală cu variația energiei sistemului.

Se notează cu  $w$  viteza centrului de inerție al corpului și  $z$  înălțimea centrului de greutate față de un nivel convențional. Dacă se neglijează energia cinetică de rotație în jurul centrului de inerție al corpului, atunci variația de energie a sistemului  $\Delta E$  se descompune în energia internă  $\Delta U$  și energia exterioară mecanică a sistemului (cinetică și potențială)

În acest caz ecuația (1) devine:

$$\sum L + \sum Q = \rho \Delta \left( \frac{w^2}{2g} + z \right) + \Delta U \quad (2)$$

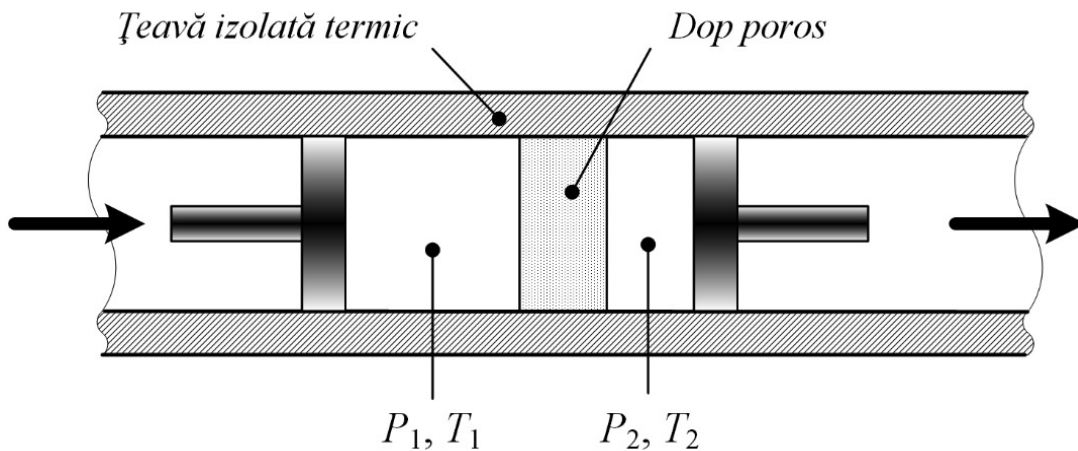


Fig. 1. Schema de studiu a procesului de laminare

Pentru cazul unui curent staționar de fluid care circulă printr-o conductă izolată orizontală ( $\Delta z = 0$ ) și pentru 1 kg de fluid, principiul conservării energiei aplicat pentru două secțiuni 1 și 2 (fig. 1), devine:

$$u_1 + p_1 v_1 + \frac{w_1^2}{2g} = u_2 + p_2 v_2 + \frac{w_2^2}{2g}, \quad \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (3)$$

unde  $(p_1 v_1 - p_2 v_2)$  este lucrul mecanic de dislocare efectuat de fluid.

Expresia  $(u + pv)$  se notează cu  $h$  și exprimă o funcție de stare numită entalpie.

$$h = u + pv, \quad \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (4)$$

Ecuția (3) devine:

$$h_1 + \frac{w_1^2}{2g} = h_2 + \frac{w_2^2}{2g}, \quad \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (3')$$

Dacă între secțiunile (1) și (2) parametrii fluidului  $p$ ,  $v$ ,  $w$ , variază astfel încât în secțiunile (1) și (2)  $w_1 \cong w_2$ , ecuația (3') capătă forma:

$$h_1 \approx h_2 \quad (5)$$



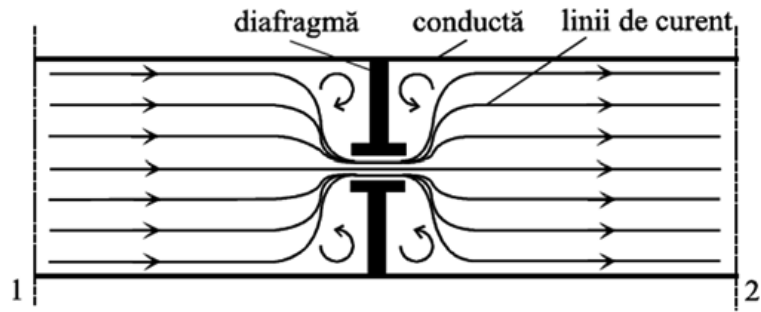


Fig. 2. Laminarea cu diafragmă

Procesul de trecere lentă de la presiune ridicată  $p_1$  la o presiune joasă  $p_2$ , care se produce la entalpie constantă se numește **laminare** sau **strangulare**. În practică, laminarea fluidelor se produce la trecerea prin diafragme, prin pereți poroși, robinete deschise parțial, etc. Aceste procese se produc fără absorbție sau cedare de căldură.

Pentru **gaze perfecte**, deși presiunea și volumul fluidului variază, temperaturile în secțiunile (1) și (2) sunt aproximativ egale:

$$T_1 \approx T_2 \quad (6)$$

De aici rezultă următoarele concluzii:

- a) Pentru gazele perfecte, entalpia depinde numai de temperatură și este independentă de presiune sau volum.

$$h = h(T); \quad \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T = 0; \quad \left( \frac{\partial h}{\partial v} \right)_T = 0. \quad (7)$$

- b) Deoarece în expresia entalpiei intră și energia internă ( $h = u + pv$ ), mai rezultă că și energia internă este funcție numai de temperatură,  $pv = RT$

$$u = u(T) \quad (8)$$

- c) Din expresia principiului I rezultă

$$dq = dh = c_p dT \quad (9)$$

Ca urmare, căldurile specifice pentru gazele perfecte sunt funcție numai de temperatură,  $c = c(T)$ .

Pentru **fluidele reale**, laminarea este un proces ireversibil datorită acțiunii forțelor de frecare, care se opun creșterii vitezei particulelor de fluid, proces care se produce cu creșterea entropiei.

Reluând ecuația (7) sub forma:

$$dq = dh - vdp = T \cdot ds \quad (10)$$

și deoarece variația vitezelor este neglijabilă,  $w_1 \approx w_2$ , laminarea se face la entalpie constantă ( $dh = 0$ ). Rezultă:

$$T \cdot ds = -vdp \quad (11)$$

Deoarece în procesul de laminare  $\Delta p = p_2 - p_1 < 0$ , atunci  $\Delta s > 0$

Spre deosebire de gazele perfecte, în procesul de laminare a gazelor reale temperaturile  $T_1$  și  $T_2$  au valori diferite, diferența fiind cu atât mai mare cu cât gazele reale se abat mai mult în comportarea lor față de gazele perfecte.

Această variație a temperaturii gazului în timpul laminării este cunoscută sub numele de **efectul Joule-Thomson**.

Efectul se numește direct când  $T_1 > T_2$  și invers  $T_1 < T_2$ .

Pentru orice gaz real, efectul poate trece de la direct la invers și există puncte de stare la care efectul este nul funcție de starea gazului.

În fig.3 sunt trasate izotermele gazului real, în coordonate  $pv = f(p)$ . Fiecărei izoterme a gazului real îi corespunde un minim pentru care gazul real se comportă ca un gaz perfect, adică:

$$\left( \frac{pv}{RT} = 1 \right)$$

Prin unirea acestor puncte, se obține o parabolă cu axa orizontală, numită **curba lui Boyle**. Curba lui Boyle, taie axa ordonatelor la temperatura ( $T_B$ ) a gazului real, numită **temperatura lui Boyle**. Pe această curbă ( $0-b-T_B$ ), gazele reale se comportă ca și gazele perfecte. De aici, se vede că fiecare gaz are o anumită stare termodinamică, la care se comportă ca un gaz perfect.

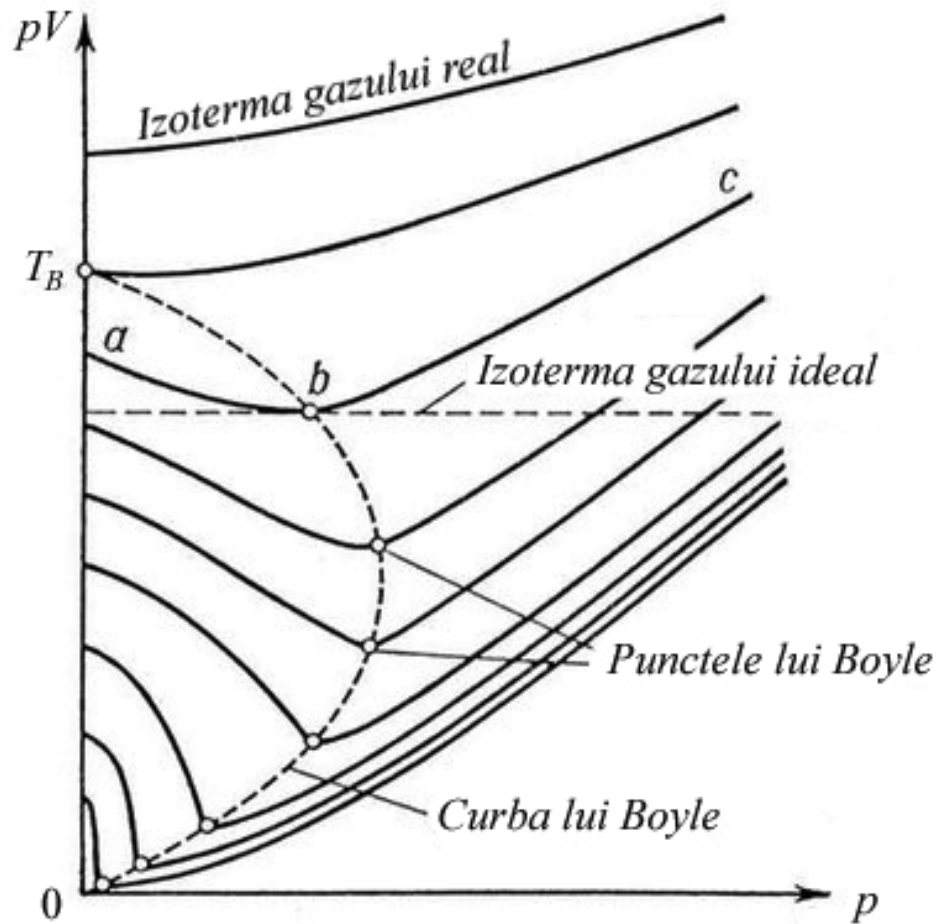


Fig. 3. Curba lui Boyle în diagrama  $pV$ - $p$

Curba lui Boyle reprezintă stările unde efectul Joule-Thomson este nul, respectiv comportamentul gazului real este similar cu al gazului ideal.

Un gaz real aflat în domeniul din stânga curbei ( $0-b-T_B$ ), fig.3, prezintă un efect Joule-Thomson direct,  $T_1 > T_2$ .

Efectul Joule-Thomson direct (adică răcirea prin detentă) este posibil numai pentru gazele care se găsesc la temperaturi mai mici decât temperatura lui Boyle ( $T_B$ ).

Pentru situațiile din dreapta curbei ( $0-b-T_B$ ) cu efect Joule-Thomson invers sunt necesare fie presiuni ridicate, peste 100 – 150 bar, mai rar întâlnite în practica industrială curentă, fie temperaturi mai mari decât  $T_B$ .

## Instalația experimentală

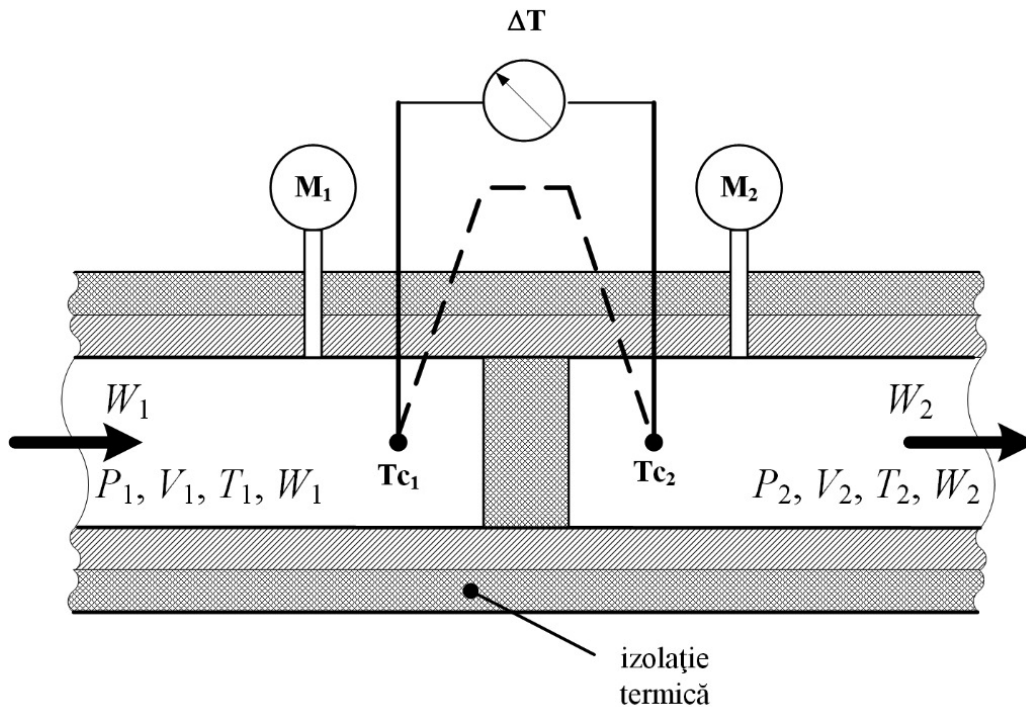


Fig.4. Schema instalației de laborator

Experiențele clasice pentru aflarea proprietăților entalpiei gazelor au fost efectuate de James Prescott **Joule** și William **Thomson** (Lord Kelvin), în 1852. Instalația originală era alcătuită dintr-o conductă cu pereți termoizolați, în care se află un dop poros. Prin conductă a circulat prin presare foarte lentă gazul care trebuia studiat.

Similar, instalația de laborator (fig. 4) este alcătuită dintr-o conductă izolată termic în interiorul căreia se află montat un dop poros. Cele două termocupluri ( $T_{c1}$  și  $T_{c2}$ ) pot fi utilizate pentru măsurători individuale, sau pot fi cuplate la un aparat diferențial pentru determinarea variației de temperaturi ( $\Delta T$ ) la trecerea aerului prin dopul poros. Manometrul  $M_1$  indică presiunea  $p_1$  înainte de laminare. Montarea manometrului  $M_2$  nu este strict necesară, deoarece după laminare presiunea  $p_2$  este egală cu presiunea atmosferică.

Aerul comprimat este furnizat de un compresor.

## Modul de lucru

Joule și Thomson au efectuat experimentele la o presiune de 6 atmosfere și temperatura între  $0^\circ - 600^\circ \text{C}$ . S-au obținut următoarele rezultate pentru:

Aer:

$$p_1 = 4 \cdot 10^5 \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right], \quad p_2 = 1 \cdot 10^5 \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right], \quad T_1 - T_2 = 0,7^\circ \text{C}$$

CO<sub>2</sub>:

$$p_1 = 4 \cdot 10^5 \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right], \quad p_2 = 1 \cdot 10^5 \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right], \quad T_1 - T_2 = 3,9^\circ \text{C}$$

H<sub>2</sub>:

$$p_1 = 4 \cdot 10^5 \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right], \quad p_2 = 1 \cdot 10^5 \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right], \quad T_1 - T_2 = 0,04^\circ \text{C}$$

Se observă că la unele gaze, cum este hidrogenul,  $T_1 \approx T_2$ , deci ele se comportă ca și gazele perfecte.

Gazul care curge prin conductă, în cazul nostru aerul, are înainte de dop presiunea  $p_1$  care poate fi stabilită la diferite valori între 2 – 4 atmosfere, iar după dop presiunea  $p_2$  este egală cu presiunea atmosferică.

Instalația va funcționa un timp de cel puțin o jumătate de oră, pentru stabilirea unui regim de echilibru, deoarece numai după stabilirea regimului staționar, schimbul de căldură prin pereți este neglijabil.

Obținerea regimului staționar se poate constata prin faptul că diferența de temperatură se menține constantă în timp.

După îndeplinirea acestor condiții (stabilirea regimului staționar) se determină diferența de temperatură  $\Delta T = T_1 - T_2$ .

În urma experiențelor, se constată că diferența este foarte mică pentru aerul uscat. Se vor efectua determinări la presiuni diferite  $p_1$ .

## Concluzii

Pentru gazele perfecte, se poate constata experimental că efectul Joule-Thomson este nul ( $T_1 = T_2$ ).

În acest mod, pentru gazele perfecte se demonstrează că:

$$h = h(T) \quad (12)$$

$$u = u(T) \quad (13)$$

$$c = c(T) \quad (14)$$

Pentru gazele reale, efectul Joule-Thomson este diferit de zero ( $T_1 \neq T_2$ ).

În cazul lucrării experimentale de laborator, deoarece se lucrează la presiuni relativ mici (fig.3) efectul Joule-Thomson este direct ( $T_1 > T_2$ ). La aerul uscat (care se apropie de gazul perfect), efectul Joule-Thomson va fi foarte mic.

## DISTRIBUȚIA TEMPERATURII ȘI FLUXUL TERMIC PENTRU CONDUȚIA STAȚIONARĂ, UNIDIMENSIONALĂ PRIN BARE METALICE, ÎN CONDIȚII DE CONTUR DE SPEȚA A III-A

Instalația de laborator permite determinarea caracteristicilor transferului de căldură și distribuției temperaturii în cazul a două bare orizontale, de secțiuni transversale constante, confecționate din două materiale diferite. Experimentele sunt efectuate în condiții de contur de speța a III-a (convecție). Rezultatele experimentale se vor compara cu cele obținute prin analiza teoretică pentru conducția prin suprafețe extinse (aripioare).

### Considerații teoretice

Pentru a putea efectua analiza teoretică a acestei probleme, trebuie clarificate elementele cunoscute și ipotezele simplificatoare.

Elementele cunoscute sunt: transfer de căldură prin conducție în bare lungi în condiții de contur de speța a III-a (flux termic convectiv la suprafață).

Ipotezele simplificatoare sunt:

- temperatura este o funcție dependentă de o singură coordonată spațială,  $T(x)$
- la orice poziție  $x$ , temperatura este constantă pentru întreaga secțiune transversală
- coeficientul convectiv de transfer de căldură  $\alpha$ , de la suprafața solidă la aer este constant în direcția axei  $x$
- conductivitatea termică a materialului este constantă și independentă de temperatură
- pierderile de căldură la capetele reci ale barelor sunt neglijate.

## Notății

$T_0$  = temperatura constantă la capătul încălzit al barei

$T_L$  = temperatura constantă la capătul rece al barei

$T_\infty$  = temperatura constantă a mediului ambiant (aer)

$T$  = temperatura într-o secțiune oarecare a barei

$L$  = lungimea barei

$P$  = perimetrul secțiunii transversale

$A_c$  = aria secțiunii transversale

Se consideră un element diferențial de volum cu secțiunea transversală variabilă  $A_c(x)$  și grosimea  $dx$ . Deoarece nu există surse interne de energie și se presupun condiții staționare, bilanțul energetic se reduce la

$$\dot{E}_i - \dot{E}_e = 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{Q}_x = \dot{Q}_{x+dx} + d\dot{Q}_{conv} \quad (1)$$

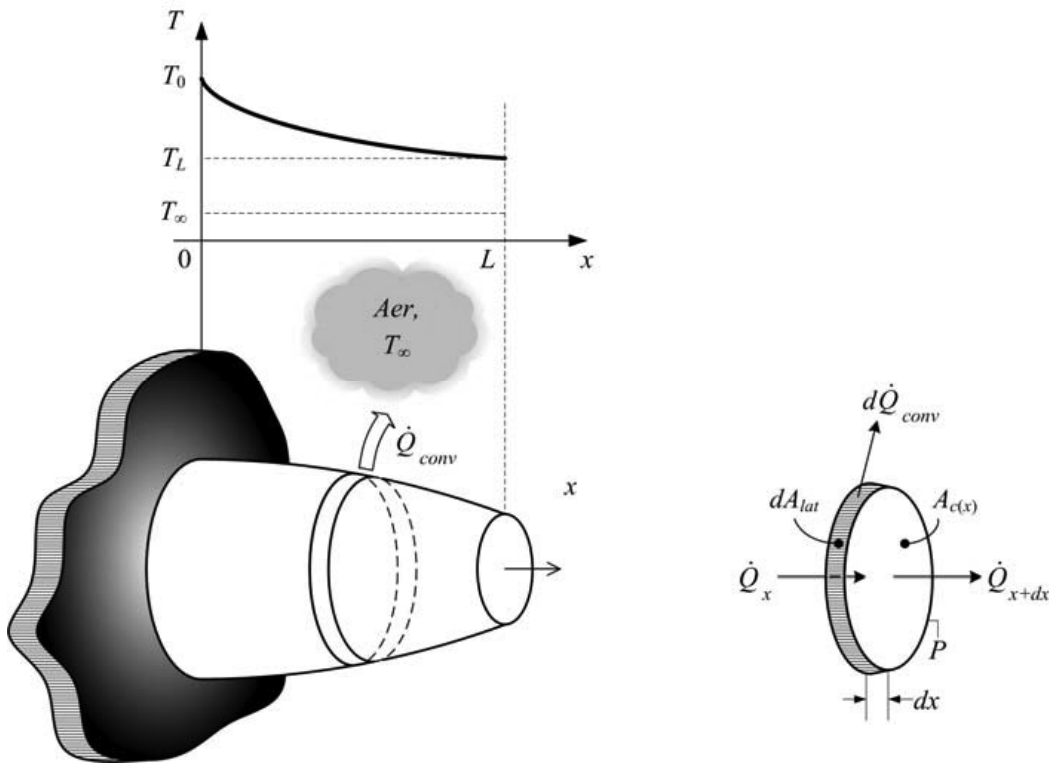


Fig. 1. Aripioară cu secțiune transversală oarecare



Folosind legile lui Fourier și Newton, cât și ipotezele simplificatoare menționate anterior, după câteva calcule matematice se obține ecuația aripioarei

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\alpha \cdot P}{\lambda \cdot A_c} \cdot (T - T_\infty) = 0 \quad (2)$$

Soluția acestei ecuații poate fi particularizată pentru fiecare caz în parte, prin aplicarea condițiilor la limită, obținându-se astfel distribuția temperaturii.

Dacă se notează temperatura în exces cu  $\theta = T_{(x)} - T_\infty$ , parametrul aripioarei cu  $m^2 = \alpha P / \lambda A_c$  și se observă că  $d\theta/dx = dT/dx$ , atunci

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - m^2 \cdot \theta = 0 \quad (3)$$

ce reprezintă o ecuație diferențială de ordin doi, liniară, omogenă, cu coeficienți constanți, care are soluția generală

$$\theta_{(x)} = C_1 \cdot e^{m \cdot x} + C_2 \cdot e^{-m \cdot x} \quad (4)$$

Pentru determinarea constantelor de integrare, se utilizează condițiile la limită. O primă condiție este temperatura constantă la capătul încălzit al barei

$$\theta_{(0)} = T_0 - T_\infty \equiv \theta_{baza} = C_1 + C_2 \quad (5)$$

A doua condiție la limită este specificată pentru capătul rece al barei, unde cantitatea de energie transferată prin vârful barei este neglijabilă în comparație cu restul suprafeței. De aceea, vârful rece al barei poate fi considerat izolat termic (condiție adiabatică la limită)

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=L} = 0 \quad (6)$$

$$C_1 \cdot e^{m \cdot L} - C_2 \cdot e^{-m \cdot L} = 0 \quad (7)$$

Rezolvând pentru constantele  $C_1$  și  $C_2$  și substituind rezultatele în soluția generală se obține distribuția de temperatură

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \frac{\cosh m(L - x)}{\cosh mL} \quad (8)$$

Ecuția fluxului termic de la suprafața barei este

$$\dot{Q}_{ar} = \sqrt{\alpha P \lambda A_c} \cdot \theta_0 \cdot \tanh mL \quad (9)$$

În ecuațiile de mai sus, s-au utilizat funcțiile hiperbolice

$$\sinh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2} \quad \cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \quad \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

## Instalația experimentală

Două bare cilindrice orizontale, una de cupru cu  $D_{Cu} = 18$  mm și cealaltă de aluminiu cu  $D_{Al} = 11$  mm, fiecare de lungime  $L = 850$  mm, sunt încălzite cu ajutorul a două rezistențe electrice  $R_{Cu}$  și  $R_{Al}$ , amplasate într-o incintă izolată.

Aparatele de măsură indică valorile pentru intensitatea curentului electric și a tensiunii pentru fiecare rezistență electrică. Distribuția temperaturii la suprafața fiecărei bare poate fi determinată cu ajutorul a 7 termocupluri (cupru-constantan), a căror poziție este măsurată cu ajutorul unei rigle gradate. Izolația incintei de încălzire asigură pierderi neglijabile de căldură către exterior, și astfel se poate presupune că întreaga energie termică generată de rezistențele electrice este transferată prin bare.



*Fig. 2. Standul de laborator*

## Modul de lucru

Desfășurarea lucrării de laborator cuprinde următoarele etape:

- se vor identifica părțile componente ale instalației experimentale
- se conectează instalația la rețea și se închide circuitul cu întrerupătorul **K**
- cu ajutorul reostatului **R** se reglează intensitatea curentului electric prin circuit, până la o valoare de  $I \cong 1.5$  A
- tensiunea aplicată rezistențelor se măsoară cu ajutorul voltmetrului **V**, comutând comutatorul Al-Cu pe poziția corespunzătoare (*Cu* pentru rezistența barei de cupru și *Al* pentru rezistența barei de aluminiu); conform montajului electric din schema de mai jos, se obține:

$$U = (R_{Al} + R_{Cu}) \cdot I = U_{Al} + U_{Cu} \quad (10)$$

- după circa 15 minute de la conectarea la rețea, se consideră condiții staționare și se pot efectua măsurătorile: se citesc valorile tensiunii și curentului pentru fiecare rezistență în parte, iar valorile temperaturii se citesc cu ajutorul comutatorului **T** succesiv pentru toate termocuplurile.

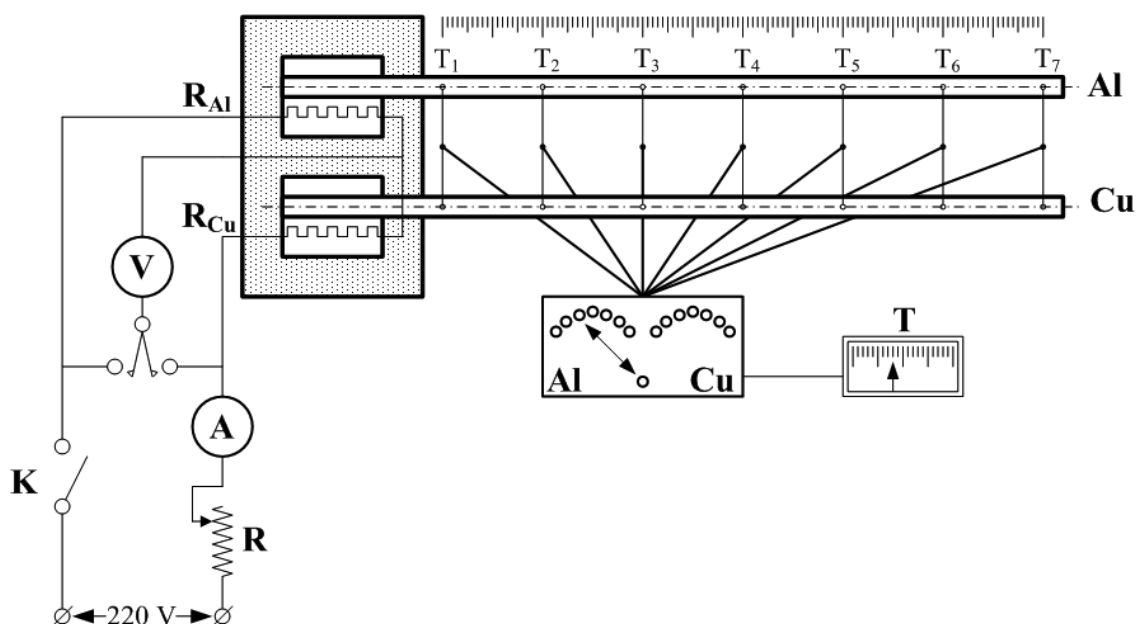


Fig. 3. Schema electrică a instalației experimentale

## Analiza datelor experimentale

Tabel 1. Date experimentale

Nr.	Mărimea măsurată sau calculată		Simbol	Unitatea de măsură	Valori			
					Măsurate		Calculate	
					Cu	Al	Cu	Al
1	Temperatura măsurată $K = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{div}$	$x_1 = 0,00$	$T$	$^\circ\text{C}$			x	x
		$x_2 = 0,12$					x	x
		$x_3 = 0,24$					x	x
		$x_4 = 0,36$					x	x
		$x_5 = 0,48$					x	x
		$x_6 = 0,60$					x	x
		$x_7 = 0,72$					x	x
2	Diferența de temperatură	$x_1 = 0,00$	$\Delta T$	$^\circ\text{C}$				
		$x_2 = 0,12$						
		$x_3 = 0,24$						
		$x_4 = 0,36$						
		$x_5 = 0,48$						
		$x_6 = 0,60$						
		$x_7 = 0,72$						
3	Intensitatea curentului electric	$I$	A					
4	Tensiunea curentului electric	$U$	V					
5	Fluxul termic, teoretic	$Q_t$	W					
6	Fluxul termic, real	$Q_r$	W					
7	Parametrul caracteristic	$m$	$\text{m}^{-1}$					
8	Suprafața de transfer de căldură	$A_s$	$\text{m}^2$					
9	Aria secțiunii transversale	$A_c$	$\text{m}^2$					
10	Conductivitatea termică	$\lambda$	W/mK	391	206			
11	Coeficientul convectiv	$\alpha$	W/m <sup>2</sup> K	12	12			

Se utilizează valorile măsurate experimental pentru temperatura în bare pentru schițarea distribuțiilor de temperatură.

Fluxurile termice reale preluate de bare se pot calcula din relațiile

$$\dot{Q}_{Al} = U_{Al} \cdot I \quad \dot{Q}_{Cu} = U_{Cu} \cdot I \quad (11)$$

Pentru valorile teoretice, se determină parametrul caracteristic  $m$  pentru fiecare material în parte. Coeficientul convectiv de transfer de căldură  $\alpha$  și conductivitatea termică,  $\lambda$ , sunt date în tabelul anterior.

Se utilizează relațiile de calcul prezentate în secțiunea teoretică, pentru determinarea distribuțiilor (teoretice) de temperatură.

Se calculează fluxurile termice și se compară valorile teoretice cu valorile măsurate experimental.



## MODELAREA ELECTRO – ANALOGICĂ ÎN CONDUȚIA TERMICĂ STAȚIONARĂ BI-DIMENSIONALĂ

Determinarea câmpului de temperatură într-un mediu material reprezintă obiectivul major în analiza fenomenelor de conducție termică. Astfel, se dorește determinarea distribuției temperaturii, adică reprezentarea modului de variație a acesteia în funcție de poziția în mediul analizat.

Cu distribuția temperaturii cunoscută, se poate calcula valoarea fluxului termic pentru orice punct al domeniului sau de pe suprafețele sale delimitatoare utilizând *Legea lui Fourier*.

Informațiile despre distribuția de temperatură pot fi folosite pentru optimizarea grosimii stratului de material izolator sau pentru determinarea compatibilității dintre diferite straturi de material.

Multe probleme teoretice sau practice din transferul de căldură, cum este și problema prezentată în această lucrare de laborator, pot fi rezolvate prin metode analitice sau numerice, acestea implicând un volum mare de calcule matematice și programare numerică. Sunt unele situații în care ecuațiile folosite pentru descrierea acestor cazuri sunt greu, dacă nu imposibil, de rezolvat, sau se dorește obținerea unor rezultate informative (nu neapărat foarte exacte). Atunci se recurge la modelarea electro-analogică.

Modelarea reprezintă o problemă experimentală, rezultatul fiind stabilit prin măsurarea unor proprietăți / mărimi fizice. Modelul, pentru care se măsoară parametrii respectivi, poate fi un model fizic, atunci când este de aceeași natură cu fenomenul studiat, sau poate fi un model analog, când natura sa poate fi diferită, dar este descris de ecuații similare.

Metoda modelării electro-analogice se bazează pe faptul că două fenomene fizice diferite (respectiv un fenomen termic și unul electric) pot fi descrise cu ajutorul a două ecuații matematice, algebrice sau diferențiale, formal identice. Există o analogie între difuzia căldurii și trecerea curentului printr-o rețea electrică. La fel cum rezistența electrică este asociată cu conducția electrică, rezistența termică poate fi asociată cu conducția termică.

## Considerații teoretice

Fluxul termic printr-un perete plan poate fi descris cu ajutorul Legii lui Fourier pentru conducție:

$$\dot{Q}_x = \lambda \cdot A \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

Prin rearanjarea ecuației, fluxul termic poate fi descris de ecuația

$$\dot{Q}_x = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{L}{\lambda \cdot A}} \Leftrightarrow \dot{Q}_x = \frac{\Delta T}{R_t} \quad (2)$$

care este similară, ca formă, cu ecuația ce descrie trecerea curentului electric,  $I_e$ , printr-o rezistență electrică  $R_e$ , cu o cădere de potențial  $\Delta U$

$$I_e = \frac{(U_1 - U_2)}{\frac{L}{\sigma_e \cdot A}} \Leftrightarrow I_e = \frac{\Delta U}{R_e} \quad (3)$$

O comparație între cele două ecuații arată similaritatea celor două fenomene: așa cum diferența de temperatură este factorul determinant în transferul de căldură, diferența de potențial reprezintă factorul determinant în cazul electric; de asemenea, fluxul termic printr-un strat de material corespunde intensității curentului electric; rezistența termică corespunde rezistenței electrice, chiar și prin modul de definire a acestora.



Dacă rezistența este definită ca fiind raportul dintre factorul determinant și fluxul termic corespunzător, atunci rezistența termică pentru conducția prin perete plan devine

$$R_t = \frac{\Delta T}{\dot{Q}_x} \Rightarrow R_{t,cond} = \frac{L}{\lambda \cdot A}, \quad [K / W] \quad (4)$$

Uneori, este mai convenabil de utilizat rezistența termică locală, ce folosește fluxul termic unitar în loc de fluxul termic

$$R_t'' = \frac{\Delta T}{\dot{Q}_x''} = R_t \cdot A \Rightarrow R_{t,cond}'' = \frac{L}{\lambda}, \quad [m^2 K / W] \quad (5)$$

De remarcat faptul că rezistența termică a unui mediu material depinde de geometria și proprietățile termice ale mediului respectiv. De asemenea, rezistența termică,  $R_t$ , și diferența de potențial,  $\Delta T$ , sunt dependente de mecanismul de transfer de căldură considerat. Astfel, se poate asocia câte o rezistență termică și pentru celelalte moduri de transfer de căldură. Pentru convecția termică, din *Legea lui Newton pentru răcire*, rezistența termică pentru convecția de la o suprafață este

$$R_t = \frac{\Delta T}{\dot{Q}_x} \Rightarrow R_{t,conv} = \frac{1}{\alpha \cdot A}, \quad [K / W] \quad (6)$$

O ecuație similară poate fi scrisă și pentru radiația termică, unde se utilizează coeficientul de transfer de căldură radiativ liniarizat. Astfel, folosind legile radiației termice, rezistența termică pentru radiație este

$$R_{t,rad} = \frac{1}{\varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s + T_{sur})(T_s^2 + T_{sur}^2)} = \frac{1}{\alpha_{rad} \cdot A}, \quad [K / W] \quad (7)$$

Reprezentarea cu circuite termice furnizează un puternic instrument de analiză atât pentru conceptualizarea cât și pentru cuantificarea problemelor de transfer de căldură. Circuitul termic echivalent este compus din rezistențe termice și noduri, ce reprezintă temperaturile suprafețelor sau ale fluidelor. Valoarea fluxului termic poate fi determinată prin considerarea întregii rețele sau a unor părți separate de noduri și elemente.

Deoarece fluxul termic este constant prin întreaga rețea, rezultă că regulile pentru circuitele electrice se pot aplica și în cazul circuitelor de rezistențe termice: când sunt în serie, rezistența termică totală este suma rezistențelor individuale

$$R_{t,serie} = \sum_j R_j = R_1 + R_2 + \dots \quad (8)$$

în timp ce pentru configurația paralel, rezistența totală va fi

$$R_{t,paralel} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (9)$$

De obicei, fenomenele termice de suprafață, radiația și convecția, apar în paralel, ceea ce poate genera complicații în rezolvarea rețelei cu rezistențe termice. Dacă  $T_\infty \approx T_{mi}$ , atunci efectul radiativ poate fi luat în considerare prin combinarea acestuia cu efectul convectiv, pentru a evita complicațiile introduse de neliniaritatea ecuațiilor radiative

$$\alpha_{combinat} = \alpha_{conv} + \alpha_{rad} \quad (10)$$

## Instalația experimentală și modul de lucru

Problemele de determinare a distribuției temperaturii în cazul conducției staționare pot fi rezolvate prin metode electro-analogice ce necesită circuite electrice cu rezistențe.

Având în vedere noțiunile teoretice prezentate mai sus, lucrarea practică de laborator a fost concepută special pentru modelarea câmpurilor termice staționare pentru un perete plan neomogen. S-a presupus că peretele selectat pentru modelare este compus din zidărie și beton armat.

Modelul electro-analogic păstrează forma modelului fizic (perete plan). Domeniul analizat a fost discretizat într-o rețea cu pasul de 75 mm în ambele direcții. Fenomenul de transfer de căldură modelat este conducția termică bi-dimensională, cu fluxuri termice în ambele direcții,  $x$  și  $y$ .

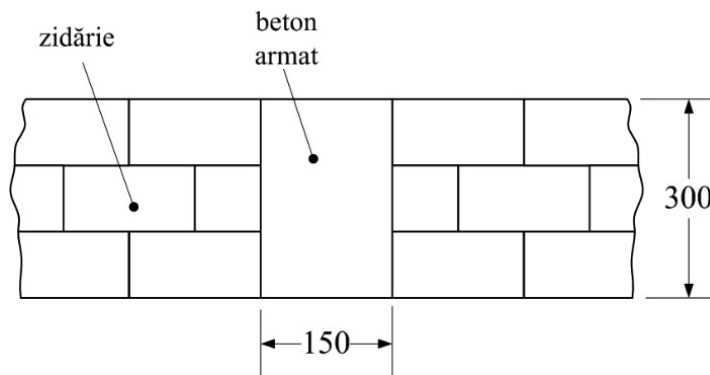


Fig. 1. Sistemul fizic analizat: perete de zidărie și beton armat

Din definițiile prezentate anterior, rezultă că rezistența reprezintă raportul dintre factorul determinant și rata de transfer corespunzătoare. Ca urmare, similar cu definiția rezistenței termice

$$R_t = \frac{\Delta T}{\dot{Q}_x} \quad (11)$$

pentru conducția electrică în același sistem, Legea lui Ohm arată că forma rezistenței electrice este:

$$R_e = \frac{\Delta U}{I_e} \quad (12)$$

Rezistențele electrice sunt calculate astfel încât să ia în considerare atât proprietățile termo-fizice ale diferitelor straturi de material alese pentru construcția peretelui  $\lambda_z$ ,  $\lambda_b$ ,  $\lambda_{zb}$  (conductivitățile termice pentru zidărie, beton armat, respectiv interfața zidărie-beton armat), cât și coeficienții convectivi de transfer de căldură  $\alpha_{in}$  la interior, respectiv  $\alpha_{ex}$  exterior). Pentru calculul rezistențelor termice s-au utilizat următoarele valori:

conductivitățile termice:  $\lambda_z = 0,58$  [W/mK]

$\lambda_b = 1,60$  [W/mK]

$\lambda_{zb} = 2,27$  [W/mK]

coeficienții convectivi:  $\alpha_{in} = 7,70$  [W/m<sup>2</sup>K]

$\alpha_{ex} = 30,3$  [W/m<sup>2</sup>K]

Ca urmare, utilizând rezultatele de mai sus, pentru rezistențele termice se obțin valorile:

$$\text{rezistențe termice conductive: } R''_{t,z} = 0,130 \text{ [m}^2 \text{ K/W]}$$

$$R''_{t,b} = 0,047 \text{ [m}^2 \text{ K/W]}$$

$$R''_{t,zb} = 0,033 \text{ [m}^2 \text{ K/W]}$$

$$\text{rezistențe termice convective: } R''_{t,in} = 0,130 \text{ [m}^2 \text{ K/W]}$$

$$R''_{t,ex} = 0,033 \text{ [m}^2 \text{ K/W]}$$

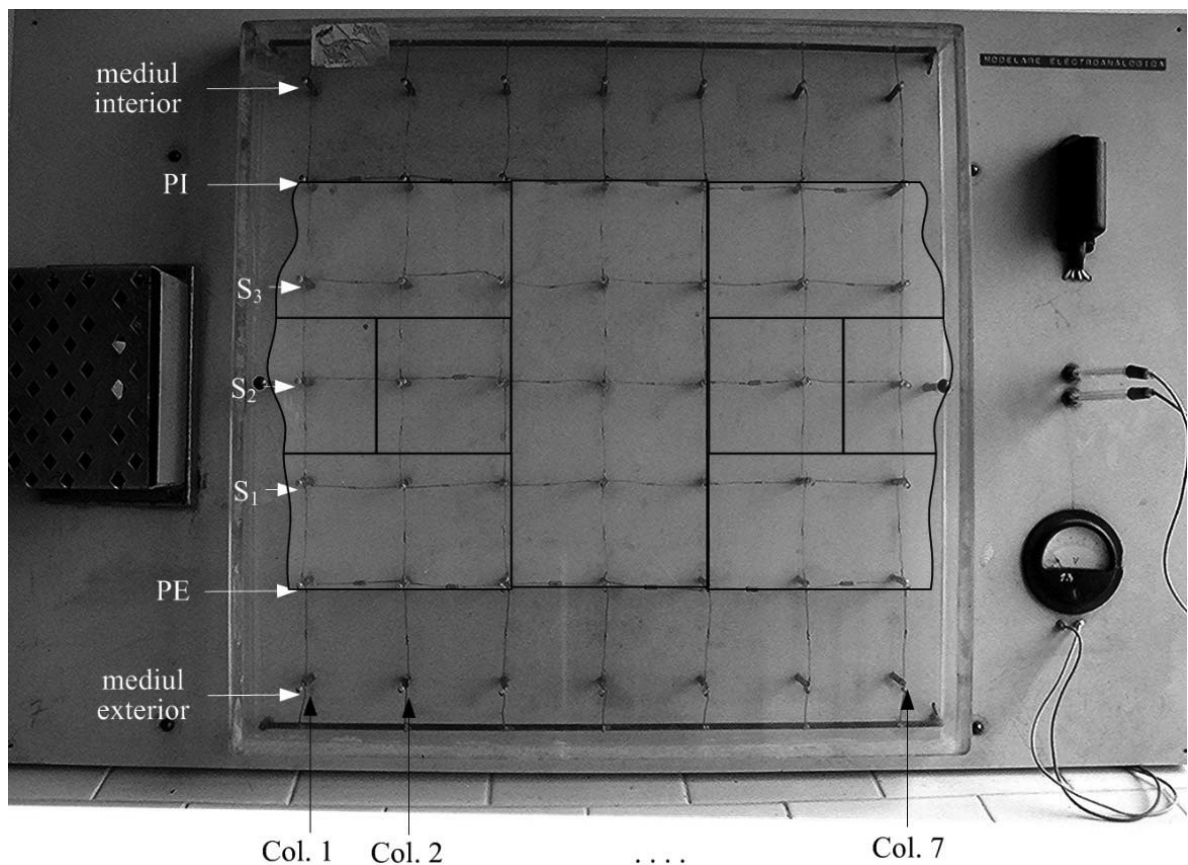
Astfel, rezistențele electrice  $R_{in}$  și  $R_{ex}$  modelează transferul de căldură convectiv de la mediul interior către suprafața interioară a peretelui, respectiv de la suprafața exterioară a peretelui către mediul exterior. Celelalte rezistențe electrice ( $R_z$ ,  $R_b$ ,  $R_{zb}$ ), modelează rezistențele termice diferite funcție de materialele folosite pentru peretele analizat.

Raportul între cele două tipuri de rezistențe este

$$\frac{R_e}{R'_t} = 10^3 \tag{13}$$

Modelul electro-analogic obținut este concretizat în standul experimental, ce constă într-o rețea de rezistențe electrice, dispuse pe șase rânduri și șase coloane. Plecând de la contactul comun superior, primul rând de rezistențe modelează transferul de căldură convectiv către perete, următoarele patru rânduri pe cel conductiv prin peretele de zidărie și beton armat, iar rândul inferior de rezistențe pe cel convectiv de la perete către mediul exterior. Cele două coloane mediane cu rezistențe modelează transferul de căldură prin partea de beton armat, iar coloanele laterale (câte două de fiecare parte) modelează transferul prin partea de zidărie.

Pentru fiecare coloană, se vor măsura diferențele de potențial raportate la primul rând de puncte de contact, care modelează mediul exterior. Astfel, o probă se menține în punctul de contact inferior, în timp ce a doua probă se plasează succesiv în celelalte puncte de contact pe verticala respectivă, până la punctul de contact superior, care modelează mediul interior.



*Fig. 2. Standul de laborator*

## **Analiza datelor experimentale**

Considerând temperatura mediului interior  $T_{in} = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$  și cea a mediului exterior  $T_{ex} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , rezultă că diferența de temperatură este  $\Delta T = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Pentru rețeaua electrică, se măsoară tensiunea dintre punctele extreme (superior și inferior, corespunzătoare mediului interior, respectiv mediului exterior), pentru a se putea calcula constanta rețelei:

$$K = \frac{\Delta T}{U} \quad (14)$$

Valorile măsurate pentru diferențele de potențial,  $U_x$ , sunt trecute în tabelul de mai jos

*Tabel 1. Date experimentale – diferențe de potențial*

Rândul	Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7
perete exterior							
secțiunea I							
secțiunea II							
secțiunea III							
perete interior							

Apoi sunt calculate diferențele de temperatură,  $\Delta T_x = K \cdot U_x$ . Aceste valori sunt trecute în tabelul de mai jos

*Tabel 2. Date calculate – diferențe de temperatură*

Rândul	Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7
perete exterior							
secțiunea I							
secțiunea II							
secțiunea III							
perete interior							

Dacă la aceste diferențe de temperatură se adaugă temperatura mediului exterior și se reprezintă grafic punctele, rezultă distribuția de temperatură, adică variația temperaturii funcție de poziție în domeniul analizat.

# DETERMINAREA COEFICIENTULUI DE TRANSFER DE CĂLDURĂ $-\alpha-$ , DE LA O ȚEAVĂ SINGULARĂ NETEDĂ LA AER, ÎN CONVECȚIE LIBERĂ NEPERTURBATĂ

## Scopul lucrării

În lucrarea de față se prezintă o instalație cu ajutorul căreia se va determina coeficientul de trecere a căldurii  $\alpha$ , de la o țeavă singulară netedă la aer (convecție liberă în spațiu nelimitat).

## Considerații teoretice

Acest mod de transmitere a căldurii este descris prin Legea lui Newton la răcire, exprimată pe unitatea de suprafață:

$$\dot{Q}''_{conv} = \alpha \cdot (T_s - T_\infty), \quad [W / m^2] \quad (1)$$

sau pe întreaga suprafață

$$\dot{Q}_{conv} = \alpha \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty), \quad [W] \quad (2)$$

Semnificația termenilor din ecuație este:

- $A_s$  suprafața de schimb de căldură,  $[m^2]$ ;
- $T_s$  temperatura fluidului la o distanță suficient de mare de perete,  $[^\circ C]$ ;
- $T_\infty$  temperatura peretelui în contact cu fluidul;

$$\text{Aici } T_s > T_\infty$$

- $\alpha$  coeficientul de trecere a căldurii,  $[W/m^2K]$ .

Coeficientul de trecere a căldurii caracterizează condițiile particulare în care are loc trecerea căldurii într-un caz dat.

În general determinarea pe cale analitică a coeficientului de trecere a căldurii este greoaie, aceasta depinzând de mai mulți factori, pentru simplificare fiind necesară acceptarea multor ipoteze.

Datorită acestor inconveniente în determinarea unei valori exacte a lui  $\alpha$  pentru un proces dat, se recurge la metode experimentale.

## Instalația experimentală

Pe un tub de sticlă s-a înfășurat (elicoidal) o folie de aluminiu prin care trece un curent alternativ sau continuu.

Fluxul de căldură  $\dot{Q}$  [W] degajat la trecerea curentului electric prin folia de aluminiu se determină din relația:

$$\dot{Q} = U \cdot I \quad (3)$$

În regim staționar căldura  $Q$  este evacuată în întregime prin radiație, convecție și conducție:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad}, \quad [W] \quad (4)$$

Pentru a măsura coeficientul  $\alpha$  este necesar să se asigure condițiile în care căldura evacuată prin radiație și conducție reprezintă o fracție neglijabil de mică față de căldura evacuată prin convecție, astfel încât:

$$\dot{Q} = U \cdot I \cong \alpha \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) \quad (5)$$

sau

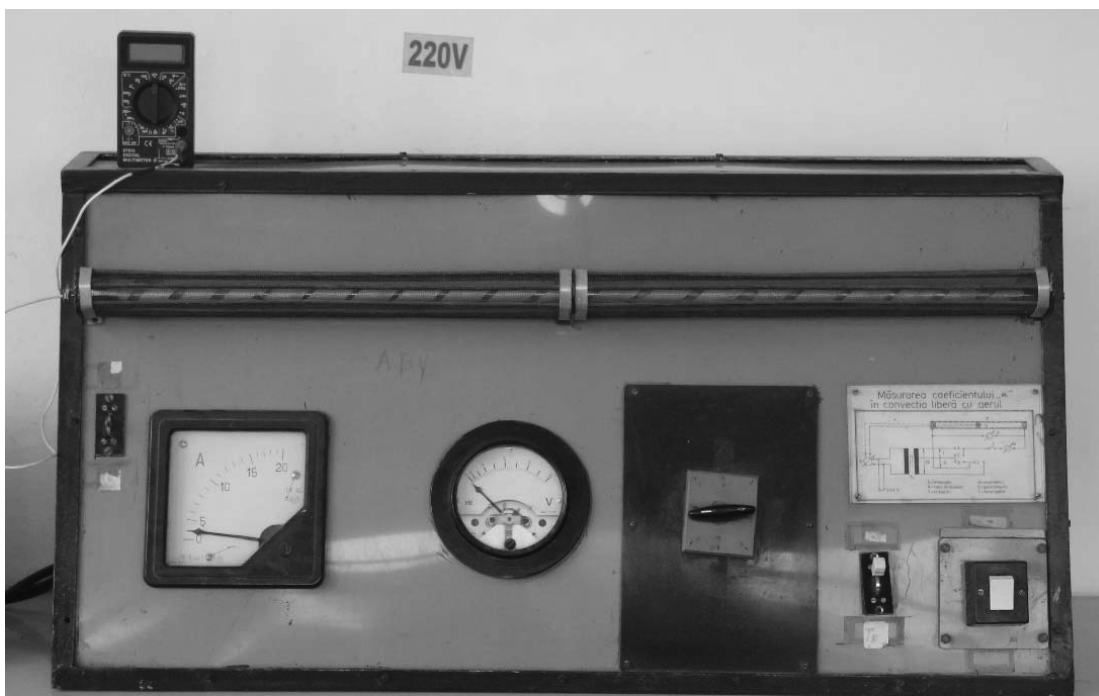
$$\alpha = \frac{U \cdot I}{A_s \cdot (T_s - T_\infty)} \quad (6)$$

în care temperatura  $T_s$  este presupusă aceeași pe întreaga suprafață a peretelui, și temperatura  $T_\infty$  este temperatura constantă a aerului înconjurător.



În această lucrare de laborator, condițiile impuse sunt realizate destul de riguros, și anume:

- aluminiul are un coeficient de emisie-absorbție prin radiație foarte scăzut.
- temperatura peretelui este mai mică de  $150^{\circ}\text{C}$ , astfel că emisia prin radiație poate fi complet neglijată.
- fenomene de conducție termică au loc atunci când regimul este nestaționar, existând un gradient radial de temperatură la gazul închis în interiorul țevii. Dat fiind diametrul mic al tubului, regimul termic staționar se stabilește rapid
- un gradient de temperatură longitudinal (în lungul țevii) nu poate apărea nici în interiorul țevii când temperatura gazului s-a uniformizat și nici în exteriorul acesteia dat fiind construcția rezistenței (folie uniformă cu rezistență electrică egală pe toată lungimea ei).
- astfel, termocuplul plasat pe axa tubului măsoară corect temperatura peretelui  $T_s$ .



*Fig. 1. Standul de laborator*

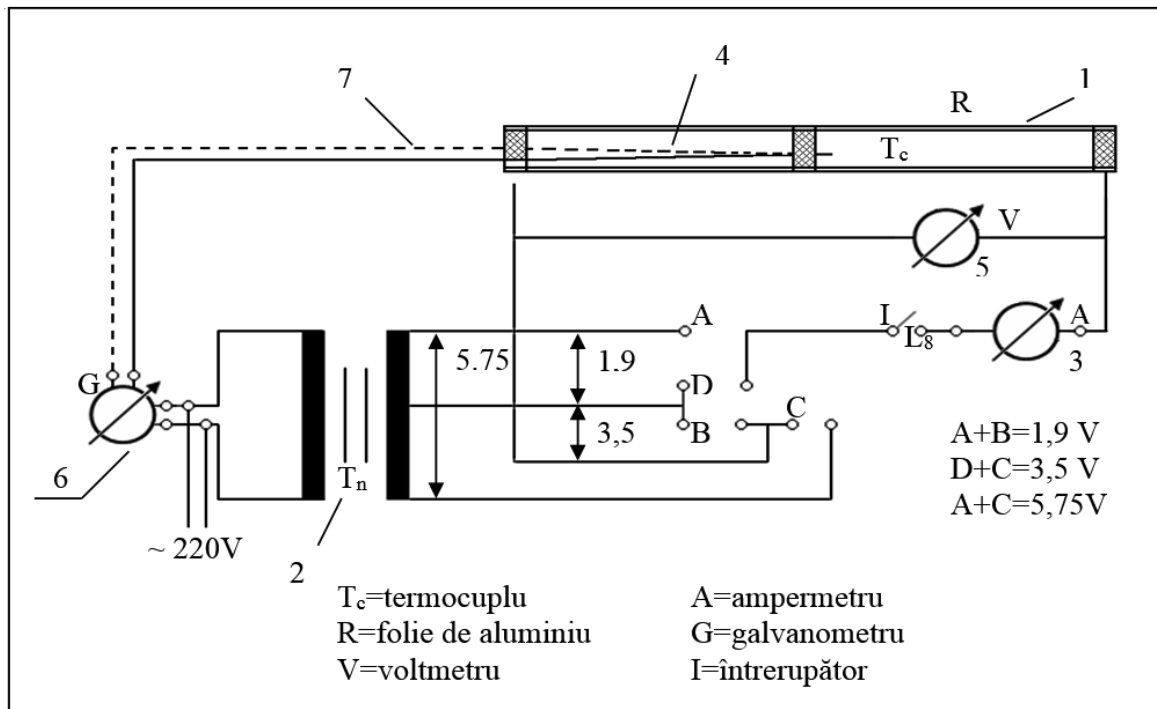


Fig. 2. Schema electrică a standului de laborator

## Modul de lucru

În figura de mai sus este redată schema instalației experimentale de laborator, cu următoarele notații:

- tubul de sticlă înfășurat cu folia de Al;
- transformatorul alimentat în primar de la o priză de 220V cu mai multe borne pe circuitul secundar care dau diferite tensiuni;
- prin combinațiile contactelor A, B, C, D se obține alimentarea instalației la 1,9V; 3,5V; 5,75V; aceste valori sunt exacte numai când tensiunea de alimentare are valoarea 220V;
- se va măsura căderea de tensiune de la bornele de alimentare a foliei de pe țevă;
- ampermetrul care indică curentul I, în [A];

- un termocuplu montat în interiorul tubului cu ajutorul căruia se măsoară diferența de temperatură  $(T_s - T_\infty)$ , [°C];
- voltmetrul pentru măsurarea căderii de tensiune pe instalație, [V];
- galvanometrul pentru măsurarea mărimii diferenței de temperatură;
- capacele de textolit care împiedică circulația aerului în interiorul tubului;
- întrerupătorul general al instalației.

## Date experimentale

Se fac conexiunile de alimentare la curent, pentru a realiza tensiunea de 1,9V, apoi de 3,5V, respectiv de 5,75V.

Pentru fiecare valoare a tensiunii se așteaptă cca. 10-15 minute pentru ca temperatura să se stabilească la o valoare constantă în timp (regim staționar).

Se calculează valorile lui  $\alpha$  conform ecuației de mai sus. Pentru calculul suprafeței de transfer de căldură se vor considera următoarele valori:

- lungimea tubului  $l = 0,835\text{m}$
- diametrul  $d = 0,012\text{m}$

## Observații

Instalația va fi strict supravegheată în tot timpul efectuării experimentelor, după care se va scoate de sub tensiune cu ajutorul întrerupătorului I.

Galvanometrul va lucra cu sensibilitatea 1/10.

Constanta galvanometrului este de 3,27 grd/div.

La terminarea experimentelor, butonul galvanometrului va fi adus pe poziția AR și galvanometrul se va scoate din priză.

Nu este permisă deplasarea galvanometrului din poziția sa.



# DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A COEFICIENTULUI DE TRANSFER DE CĂLDURĂ LA MIȘCAREA LIBERĂ A FLUIDULUI ÎN SPAȚIU LIMITAT

## Scopul lucrării

Se prezintă o metodă și instalația experimentală de laborator utilizată pentru determinarea coeficientului de trecere a căldurii în cazul convecției libere în spațiu limitat. Acest fenomen termic apare, de exemplu, în cazul tratamentelor termice, piesele respective fiind introduse într-un cuptor încălzit la o temperatură dată. Este necesar să se cunoască evoluția câmpului de temperatură în piesă, în funcție de timp, evoluție care depinde de condițiile de trecere a căldurii de la mediu la corp.

## Considerații teoretice

Calculul transferului de căldură de la un fluid la un solid se bazează pe legea lui Newton:

$$\dot{Q}_{conv} = \alpha \cdot A_s \cdot (T_\infty - T_s), \quad [W] \quad (1)$$

Se observă că spre deosebire de lucrarea de laborator anterioară, unde transferul de căldură avea sensul de la solid (tubul încălzit electric) către fluid (aerul din mediul ambiant, spațiu nelimitat), aici sensul este de la fluidul încălzit (aerul din spațiul limitat din incinta cuptorului) către solid. Ca urmare, ordinea termenilor dintre paranteze ( $\Delta T$ ) s-a modificat corespunzător, astfel încât fluxul termic să rămână întotdeauna pozitiv.

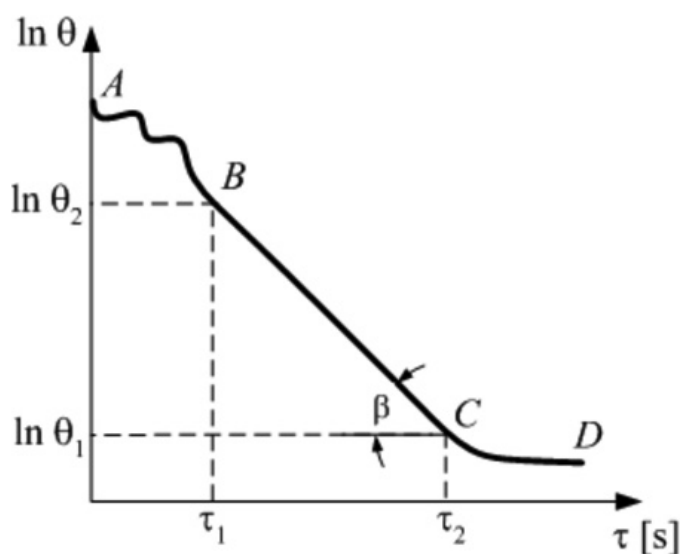


Fig. 1. Procesul de încălzire

Analiza transferului de căldură în interiorul corpului solid se bazează pe teoria transferului de căldură conductiv tranzitoriu.

Dacă temperatura fluidului  $T_\infty$  rămâne constantă, atunci în timpul procesului de încălzire (sau răcire) se pot distinge trei regiuni:

- regiunea de încălzire dezordonată (AB)
- regiunea de încălzire uniformă (BC)
- regiunea de tranziție către echilibrul termic (CD)

Regiunea de încălzire uniformă este caracterizată de faptul că variația câmpului de temperatură într-o anumită poziție din interiorul solidului poate fi exprimată prin relația:

$$\ln \theta = -m \cdot \tau + C \quad (2)$$

unde

- |                         |  |
|-------------------------|--|
| $\theta = T_\infty - T$ | diferența de temperatură, [°C]                                     |
| $T_\infty$              | temperatura fluidului, [°C]  |
| $T$                     | temperatura la o anumită poziție în solid, la timpul $\tau$ , [°C] |
| $\tau$                  | timpul, [s]  |
| $C$                     | constantă ce depinde de condițiile inițiale                        |
| $m$                     | ritmul de desfășurare a procesului                                 |

Ritmul de desfășurare a procesului reprezintă tocmai panta dreptei corespunzătoare acestei faze, și poate fi calculată ca:

$$m = \tan \beta = \frac{\ln \theta_2 - \ln \theta_1}{\tau_2 - \tau_1} \quad (3)$$

în care:

$$\theta_1 = T_\infty - T_1 \quad \text{diferența de temperatură la momentul } \tau_1, [\text{°C}]$$

$$\theta_2 = T_\infty - T_2 \quad \text{diferența de temperatură la momentul } \tau_2, [\text{°C}]$$

Dat fiind faptul că în timpul procesului de încălzire câmpul de temperatură nu este uniform, legea lui Newton devine:

$$\dot{Q}_{conv} = \psi \cdot \alpha \cdot A_s \cdot (T_\infty - T_s), \quad [W] \quad (4)$$

în care gradul de ne-uniformitate al câmpului de temperatură ( $\psi$ ) este definit ca o funcție adimensională de forma:

$$\psi = \frac{\theta_{ms}}{\theta_{mv}} \quad (5)$$

și este dependentă de grupurile adimensionale *Biot* și *Fourier*:

$$\Psi = \Psi_{(Bi, Fo)} \quad (6)$$

$$Bi = \frac{\alpha \cdot L_c}{\lambda} \quad (7)$$

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{L_c^2} \quad (8)$$

În relațiile de mai sus au fost utilizate următoarele notații:

$\theta_{ms}$       diferența medie de temperatură a suprafeței corpului în contact cu mediul

$\theta_{mv}$       diferența medie de temperatură a volumului corpului

$L_c$         dimensiunea geometrică caracteristică, [m]

$\lambda$          coeficientul de conductibilitate termică, [W/mK]

Coeficientul de difuzibilitate termică,  $a$ , se determină cu relația

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}, \left[ \frac{m^2}{s} \right] \quad (9)$$

Numărul adimensional Biot reprezintă un instrument de evaluare a căderii de temperatură în interiorul corpului solid raportată la diferența de temperatură dintre fluid și suprafața solidului. Numărul adimensional Fourier reprezintă timpul adimensional.

Coeficientul convectiv de transfer de căldură depinde de orientarea și forma suprafeței solide, prin gradul de ne-uniformitate. În acest caz, avem un corp de forma geometrică regulată, cu dimensiuni cunoscute care este încălzit de la un mediu cu temperatură constantă.

Fluxul termic este transferat prin conducție de la suprafața corpului către interior și poate fi calculat cu o ecuație calorimetrică:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p (T_\infty - T), \quad [W] \quad (10)$$

Ținând seama de ecuațiile de mai sus, se obține relația de calcul a lui  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{m \cdot c_p \cdot \rho}{\psi} \cdot \frac{V}{S}, \quad [W / m^2 K] \quad (11)$$

Această ecuație arată că se poate determina coeficientul de transfer de căldură dacă se cunoaște:

- forma și dimensiunile corpului ( $S$ ,  $V$ )
- parametrii fizici ai corpului ( $\rho$ ,  $c_p$ ,  $\lambda$ )
- ritmul procesului ( $m$ ).

În lucrare se utilizează o piesă de oțel având o formă cilindrică cu raza  $R$  și înălțimea  $H$ . Schimbul de căldură se realizează prin suprafața laterală și prin una din suprafețele frontale ale acesteia. În acest caz ecuația de mai sus devine:

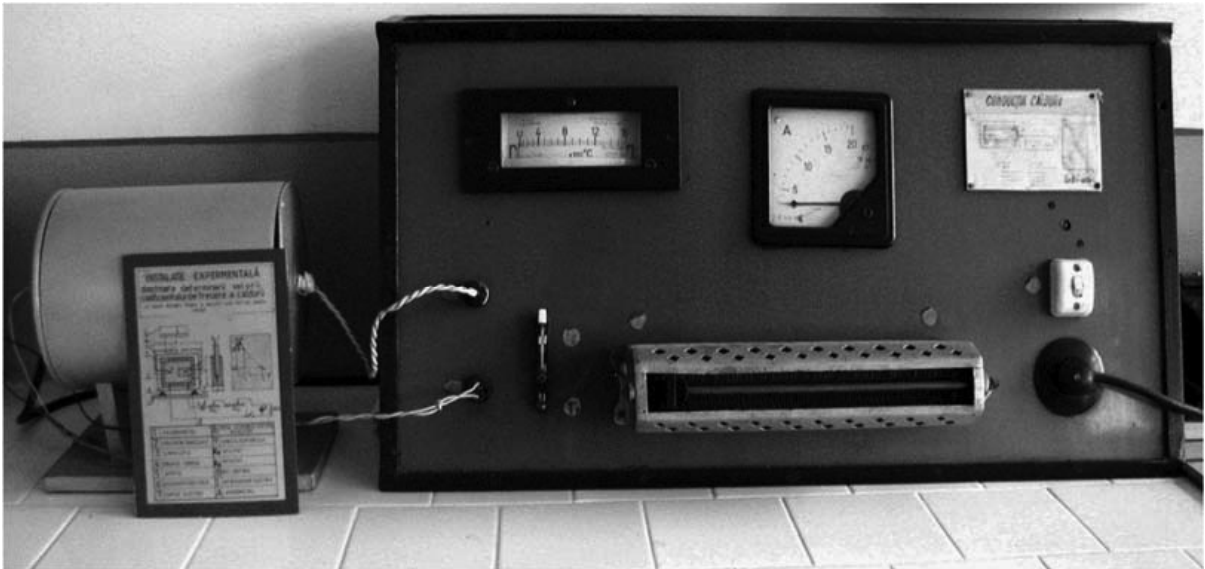
$$\alpha = \frac{m \cdot c_p \cdot \rho}{\psi} \cdot \frac{R \cdot H}{R + 2H}, \quad [W / m^2 K] \quad (12)$$



Pentru calculul gradului de ne-uniformitate al câmpului de temperatură se aplică ecuația:

$$\psi = 1 - \frac{R^2}{8} \cdot \frac{m}{a} \quad (13)$$

## Instalația experimentală



*Fig. 2. Standul de laborator*

Pentru determinarea experimentală a coeficientului de trecere a căldurii în cazul convecției libere în spațiu limitat (regim nestaționar) s-a conceput o instalație compusă din:

- cuptor electric bine izolat termic
- cilindru de oțel montat pe capacul de etanșare a cuptorului
- două termocupluri: unul pentru măsurarea temperaturii aerului din cuptor, și altul pentru măsurarea temperaturii din interiorul corpului într-un punct dat
- un galvanometru
- un cronometru.

## Modul de lucru

Se închide cuptorul cu un capac normal și se conectează circuitul electric de încălzire al cuptorului.

Reostatul pentru reglajul grosier și cel pentru reglajul fin se aduc în poziția de rezistență minimă și se așteaptă până când galvanometrul indică valoarea de aproximativ 100 °C. Se modifică apoi rezistențele reostatelor la valori aproape maxime și se așteaptă atingerea unei temperaturi constante în cuptor.

După ce s-a atins această temperatură constantă se scoate capacul normal și se introduce în cuptor capacul de etanșare cu piesa cilindrică.

Se pornește cronometrul. Timp de 30 minute, se citește din minut în minut temperatura  $T$  în axa cilindrului.

Se recomandă și verificarea temperaturii cuptorului ( $T_{\infty}$ ) din 5 în 5 minute și efectuarea eventualelor reglaje fine.

## Date experimentale

Pentru fiecare pas de timp pentru care s-a citit temperatura, se determină diferența de temperatură,  $\theta$ , și se calculează logaritmul natural al acestei valori.

Valorile sunt reprezentate într-un grafic, funcție de timp,  $\theta = \theta(\tau)$ , pe care se vor identifica regiunile procesului de încălzire al piesei. În calcule se va ține seama că galvanometrul are constanta

$$K = 0,24 \left[ \frac{\text{grd}}{\text{div}} \right] \quad (14)$$

Odată identificate începutul (punctul B) respectiv sfârșitul (punctul C) regiunii de încălzire uniformă, se poate determina ritmul procesului de încălzire:

$$m = \frac{\ln \theta_C - \ln \theta_B}{\tau_C - \tau_B} \quad (15)$$



Se cunosc datele inițiale pentru geometria și materialul din care este confecționată piesa cilindrică:

$R$	$12,2 \cdot 10^{-3}$	[m]
$H$	$60,5 \cdot 10^{-3}$	[m]
$c_p$	503	[J/kgK]
$\rho$	7700	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\lambda$	52,4	[W/mK]

Acum sunt disponibile toate datele pentru a putea determina difuzivitatea termică, și apoi gradul de ne-uniformitate.

Se determină coeficientul convectiv de transfer de căldură.

## DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A EMISIVITĂȚII CORPURILOR CENUȘII (GRADUL DE NEGRU)

În cazul convecției termice sau a convecției este necesară prezența unui solid, respectiv a unui solid și un fluid. Radiația termică apare chiar dacă există sau nu materie ca mediu de transfer, adică *nu este necesară prezența unui mediu material* pentru ca fenomenul de radiație termică să se producă.

Un alt element caracteristic radiației termice este că toate corpurile aflate la temperaturi finite, adică mai mari decât zero absolut,  $T_s > 0$  [K], emit radiație termică.

De remarcat că temperatura se exprimă ca *temperatură absolută*, măsurată în *Kelvin*.

De asemenea, radiația termică poate fi considerată a fi atât un *fenomen de volum*, cât și un *fenomen de suprafață*. Pentru gaze și medii semi-transparente emisia este un fenomen de volum; pentru majoritatea lichidelor și solidelor, fenomenul este considerat a fi unul de suprafață.

Radiația termică *emisă* de o suprafață depinde de energia internă a corpului respectiv, iar *puterea de emisie* a suprafeței  $E$  [W/m<sup>2</sup>] reprezintă energia emisă prin radiație pe unitatea de suprafață, în toate direcțiile și pe toate lungimile de undă.

Cantitatea de radiație emisă de o suprafață depinde de condițiile termice existente și de proprietățile fizice ale suprafeței.

Este necesară definirea unui **standard** de comparație pentru cantitățile de energie emise prin radiație termică de către diferite corpuri.

Astfel, conceptul de *corp negru* introduce un *corp ideal* cu proprietățile:

- absoarbe întreaga radiație incidentă (pe toate lungimile de undă, în toate direcțiile)
- dacă temperatura și lungimea de undă sunt specificate, emite mai multă energie decât orice altă suprafață este un emitor difuz (radiația are aceeași intensitate în toate direcțiile)

Spre deosebire de corpul ideal, toate *corpurile reale* sunt considerate *corpuri cenușii*.

## Conșiderații teoretice

Limita superioară a puterii de emisie corespunde suprafeței ideale, corpul negru, și este caracterizată de legea Stefan – Boltzmann. Indicele “**cn**” este utilizat pentru a distinge variabilele ce caracterizează corpul negru. Astfel, puterea de emisie spectrală pentru un emitor difuz este:

$$E_{\lambda, cn} = \pi \cdot I_{\lambda, cn} = \frac{2\pi \cdot c_0^2 \cdot h \cdot \lambda^{-5}}{e^{c_0 \cdot h / (\lambda \cdot k \cdot T)} - 1} \quad (1)$$

unde  $h = 6,6256 \times 10^{-34}$  [Js] este constanta lui Planck,  $k = 1,3805 \times 10^{-23}$  [J/K] este constanta lui Boltzmann, și  $c_0 = 2,9979 \times 10^8$  [m/s] viteza luminii în vid.

Puterea de emisie totală pentru un corp negru (ideal) este calculată cu **legea Stefan – Boltzmann**:

$$E_{cn} = \int_0^\infty E_{\lambda, cn} d\lambda = \frac{2\pi^5 \cdot k^4}{15c_0^2 \cdot h^3} \cdot T_s^4 = \sigma \cdot T_s^4 \quad (2)$$

adică

$$E_{cn} = \sigma \cdot T_s^4 \quad (3)$$

unde  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>] este constanta Stefan – Boltzmann și  $T_s$  [K] este temperatura suprafeței.

În comparație cu valorile pentru suprafața ideală, fluxurile termice emise prin radiație de o suprafață reală (de obicei numită suprafață *cenușie difuză*) sunt mai mici decât cele pentru un corp negru aflat la aceeași temperatură.

Pentru o suprafață reală, *emisivitatea*  $\varepsilon$  reprezintă raportul dintre radiația emisă de o suprafață reală aflată la o anumită temperatură și radiația emisă de un corp negru aflat la aceeași temperatură.

Deci, emisivitatea reprezintă o comparație a unui corp real cu corpul negru,  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , și mai este cunoscută ca *gradul de negru*.

Valoarea emisivității depinde puternic de materialul suprafeței și de finisarea acesteia. Astfel, emisivitatea spectrală semisferică devine

$$\varepsilon_{\lambda(\lambda,T)} = \frac{E_{\lambda(\lambda,T)}}{E_{\lambda,cn(\lambda,T)}} \quad (4)$$

și emisivitatea totală semisferică devine

$$\varepsilon_{(T)} = \frac{E_{(T)}}{E_{cn(T)}} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda(\lambda,T)} \cdot E_{\lambda,cn(\lambda,T)} d\lambda}{\sigma \cdot T^4} \quad (5)$$

Astfel, puterea totală de emisie pentru un corp cenușiu este

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (6)$$

Energia emisă prin radiație termică reprezintă puterea de emisie pentru întreaga suprafață, adică

- pentru un corp negru

$$\dot{Q}_{cn} = \int_{A_s} E_{cn} dA_s = \sigma \cdot A_s \cdot T^4, \quad [W] \quad (7)$$

- pentru un corp cenușiu

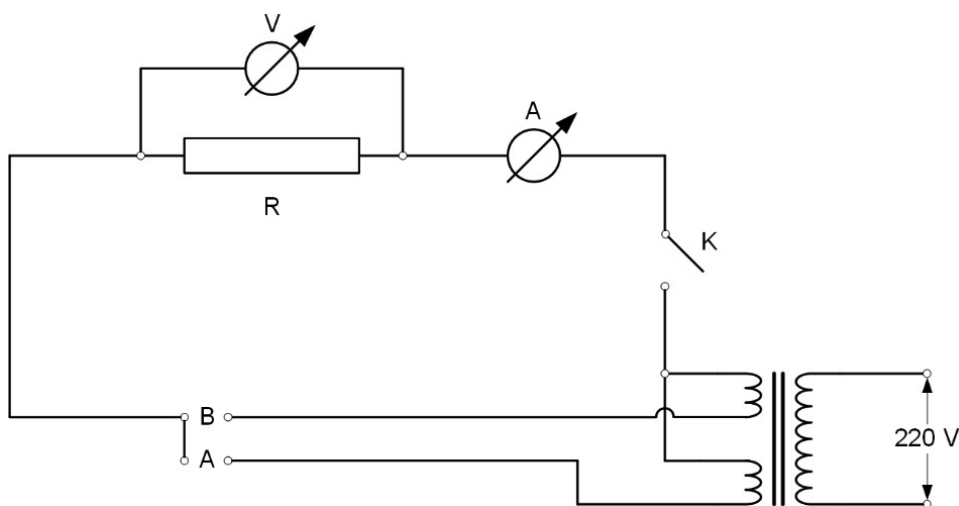
$$\dot{Q} = \int_{A_s} E dA_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T^4, \quad [W] \quad (8)$$

## Instalația experimentală și modul de lucru

Standul experimental prezentat în imaginea de mai jos este proiectat să măsoare emisivitatea unei benzi de crom-nichel. Prin banda metalică trece un curent electric a cărui valoare poate fi variată prin poziționarea comutatorului principal. Ampermetrul și voltmetrul vor indica intensitatea curentului, respectiv căderea de potențial pe banda metalică.



*Fig. 1. Standul de laborator*



*Fig. 2. Schema electrică a standului de laborator*



Temperatura benzii metalice este măsurată cu ajutorul unui pirometru optic de comparație montat în instalația experimentală.

Standul de laborator a fost proiectat să permită determinarea emisivității corpurilor cenușii prin aplicarea bilanțului energetic la un volum de control.

Energia totală generată de trecerea curentului electric prin banda metalică este disipată către fluidul înconjurător (aer) prin convecție și radiație (nu se poate neglija radiația termică, datorită temperaturilor ridicate).

$$\dot{E}_i + \dot{E}_{gen} - \dot{E}_e = \frac{dE_{st}}{dt} = \dot{E}_{st} \quad (9)$$

Din analiza volumului de control, termenul energiei intrate este zero (se neglijează radiația incidentă datorată corpurilor înconjurătoare, care este mai mică decât radiația emisă cu circa trei ordine de mărime). De asemenea, se neglijează efectele de conducție, și datorită faptului că se consideră condiții staționare termenul de stocare este zero.

Termenul energiei generate reprezintă de fapt conversia energetică din energie electrică în energie termică și este cuantificată prin ecuația

$$\dot{E}_{gen} = U \cdot I \quad (10)$$

Termenul energiei ieșite din volumul de control are două componente: fluxurile termice radiativ și convectiv. Acestea se determină din ecuațiile corespunzătoare pentru convecție (*Legea lui Newton la răcire*)

$$\dot{Q}_{conv} = \alpha \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty), \quad [W] \quad (11)$$

și pentru radiație (*Legea Stefan-Boltzmann*)

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T_s^4 \quad (12)$$

Având în vedere considerațiile de mai sus, bilanțul energetic devine:

$$\dot{E}_{gen} - \dot{E}_e = 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{E}_{gen} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad (13)$$

adică:

$$U \cdot I = \alpha \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T_s^4 \quad (14)$$

Astfel, emisivitatea corpului cenușiu se calculează din expresia

$$\varepsilon = \frac{U \cdot I - \alpha \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty)}{\sigma \cdot A_s \cdot T_s^4} \quad (15)$$

În ecuația de mai sus,  $U$  și  $I$  sunt indicate de instrumentele de măsură din instalația experimentală,  $T_s$  este temperatura suprafeței benzii determinată cu ajutorul pirometrului optic,  $T_\infty$  se determină cu un termometru de ambient și  $\sigma$  este constanta Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>]).

Având în vedere ecuația determinată mai sus, **modul de lucru** constă în efectuarea următoarelor etape:

- se măsoară dimensiunile geometrice ale benzii (sunt sugerate valorile orientative: lungime  $l = 16$  cm și lățimea  $w = 4$  mm; grosimea se neglijează); se poate calcula suprafața de schimb de căldură  $A_s$
- se conectează instalația de laborator la priza de alimentare
- se aduce întrerupătorul principal în poziția PORNIT
- se rotește comutatorul în una din pozițiile disponibile și se așteaptă câteva minute pentru a se asigura atingerea condițiilor staționare de funcționare
- folosind pirometrul optic, se determină temperatura benzii,  $T_s$ . În câmpul vizual al obiectivului se vizează banda incandescentă; se apasă butonul de conectare al pirometrului și se menține în această poziție pentru a asigura trecerea curentului electric prin circuitul filamentului; se rotește reostatul de reglaj până la coincidența culorilor benzii și a filamentului; se citește valoarea temperaturii pe instrumentul indicator
- se citesc valorile pentru intensitate și tensiune
- se citește valoarea temperaturii aerului ambiant,  $T_\infty$

Procedura se poate repeta pentru diferite poziționări ale comutatorului principal, respectiv valori diferite ale curentului și tensiunii.

## Date experimentale

Pentru a calcula emisivitatea  $\varepsilon$  este necesară determinarea coeficientului convectiv de transfer de căldură  $\alpha$ , prin parcurgerea etapelor:

1. se determină temperatura medie,  $T_m$

Deoarece temperatura fluidului variază de la temperatura suprafeței  $T_s$  la temperatura aerului ambiental  $T_\infty$ , parametrii fluidului se determină la

$$T_m = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (16)$$

2. din tabel, la temperatura  $T_m$ , se determină proprietățile termo-fizice ale fluidului (aer), inclusiv numărul Prandtl

*Tabel 1. Proprietățile termo-fizice ale aerului*

$T_m$	$\lambda \cdot 10^2$	$\nu \cdot 10^6$	$Pr$	$a \cdot 10^6$
[°C]	[W/mK]	[m <sup>2</sup> /s]	[-]	[m <sup>2</sup> /s]
300	4,605	48,33	0,674	71,706
350	4,907	55,46	0,676	82,041
400	5,210	63,09	0,678	92,053
500	5,745	79,38	0,687	115,545
600	6,222	96,89	0,699	138,612
700	6,710	115,40	0,706	163,456
800	7,115	134,80	0,713	129,060
900	7,629	155,10	0,717	215,716
1000	8,071	177,10	0,719	246,314
1100	8,401	199,30	0,722	276,832
1200	9,152	223,70	0,724	308,977

Numărul *Prandtl* reprezintă raportul dintre difuzia impulsului și difuzia termică, adică difuzia momentului datorată forțelor de vâscozitate și difuzia energiei datorată proprietăților fluidului (conductivitate termică / acumulare)

$$\text{Pr} = \frac{v}{a} = \frac{\text{difuzia impulsului}}{\text{difuzia termică}} \quad (17)$$

Pentru gaze, numărul Prandtl este  $\text{Pr} \cong 1$ . Numerele Prandtl mari corespund uleiurilor grele, unde forțele de vâscozitate sunt importante, în timp ce numerele Prandtl mici corespund metalelor lichide, efectele de vâscozitate fiind neglijabile, comparativ cu difuzia energiei.

3. se calculează numărul Grashof. Numărul *Grashof* reprezintă raportul

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L_c^3}{v^2} = \frac{\text{forțe ascensionale}}{\text{forțe de vâscozitate}} \quad (18)$$

Se observă că numărul Grashof are aceeași semnificație fizică la convecția naturală ca și numărul Reynolds pentru cea forțată. Astfel, numere Grashof mici înseamnă forțe de vâscozitate mari, deci regim laminar de curgere. Numerele Grashof mari arată forțe ascensionale mai mari decât cele de vâscozitate, iar regimul de curgere devine turbulent. Mai sus  $g$  [ $\text{m/s}^2$ ] reprezintă accelerația gravitațională, și  $\beta$  [ $\text{K}^{-1}$ ] reprezintă coeficientul de expansiune volumetrică

$$\beta = \frac{1}{T_m}, \quad [\text{K}^{-1}] \quad (19)$$

4. se determină constantele  $C$  și  $n$ , din tabelul 2.

În convecția naturală, numărul *Nusselt* are forma

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot L_c}{\lambda} = C \cdot (\text{Gr}_m \cdot \text{Pr}_m)^n \quad (20)$$

unde  $\text{Gr}_m$  este numărul *Grashof* mediu,  $\text{Pr}_m$  este numărul *Prandtl* mediu, iar valorile pentru constanta  $C$  și exponentul  $n$  sunt precizate în tabel funcție de produsul  $(\text{Gr}_m \cdot \text{Pr}_m)$ .

Tabel 2. Valorile coeficienților  $C$  și  $n$

$(Gr_m \cdot Pr_m)$	$C$	$n$
$10^{-4} - 10^{-3}$	0,500	0
$10^{-3} - 5 \cdot 10^2$	1,180	1/8
$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,450	1/4
$2 \cdot 10^7 - 10^{13}$	0,135	1/3

5. se calculează numărul Nusselt și apoi coeficientul convectiv de transfer de căldură,  $\alpha$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L_c}{\lambda} \Rightarrow \alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L_c} \quad (21)$$

**ATENȚIE** la alegerea dimensiunii caracteristice  $L_c$  la etapele 3 și 5 !

Astfel, avem clarificate toate variabilele necesare pentru a putea calcula emisivitatea unei suprafețe cenușii:

$$\varepsilon = \frac{U \cdot I - \alpha \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty)}{\sigma \cdot A_s \cdot T_s^4} \quad (22)$$