


**UNIVERSITATEA DE STAT DIN MOLDOVA**

**FACULTATEA DE FIZICĂ ŞI INGINERIE**

**Departamentul Fizică Teoretică „Iu. Perlin”**

**Virginia GURĂU**

# Măsurări debit gaze şi lichide

## Îndrumar metodic

## pentru lucrările de laborator

**Aprobată de**
**Consiliul Calității USM**

**Chişinău, 2026**

**CZU 533.6.08+532.57(076.5)**
**G 9**

**Recomandată de:**
Departamentul Fizica Teoretică „Iu. Perlin”
(proces-verbal nr.4 din 04.12.2025 );
Comisia de Asigurare a Calității a Facultaţii de Fizică şi Inginerie
(proces-verbal nr.4 din 11.12.2025);
Consiliul Facultaţii de Fizică şi Inginerie (proces-verbal nr.4 din 11.12.2025);
Consiliul de Asigurare a Calității USM (proces-verbal nr.3 din 29.12.2025)

**Autor:**
**Virginia GURĂU**, doctor în științe fizico-matematice. conferențiar universitar

Recenzenți:
**Natalia NEDEOGLO**, doctor în științe fizico-matematice, conferențiar universitar, USM;
**Tatiana APOSTOL**, șef laborator Presiuni și Forță, Institutul Naţional de Metrologie

Îndrumările metodice se adresează studenților specialității 0710.2 „Metrologie și instrumentație virtuală” și cuprind un set de opt lucrări de laborator. Fiecare lucrare este concepută ca un demers didactic complet, incluzând obiectivele urmărite, suportul teoretic necesar, descrierea etapelor de realizare a lucrării, întrebări pentru verificarea și evaluarea cunoștințelor, precum și bibliografia aferentă.

**DESCRIEREA CIP A CAMEREI NAŢIONALE A CĂRŢII**

**Gurău, Virginia.**
Măsurări debit gaze şi lichide: Îndrumar metodic pentru lucrările de laborator / Virginia Gurău; Universitatea de Stat din Moldova, Facultatea de Fizică şi Inginerie, Departamentul Fizică Teoretică "Iu. Perlin". – Chişinău: Editura USM, 2026. – 106, [5] p.: fig., tab.
Bibliogr.: p. 104 (9 tit.). – 20 ex.
ISBN 978-9975-77-524-3.
Text: nemediat.
533.6.08+532.57(076.5)
G 9

**ISBN 978-9975-77-524-3**

© V.Gurău, 2026

# CUPRINS

PRELIMINARII / 5
Note teoretice generale / 7
1. Unități de măsură ale presiunii / 7
2. Presiunea în lichide şi gaze / 7
2.1. Presiunea pistonului / 7
2.2. Presiunea coloanei de lichid / 8
2.3. Presiunea şi volumul gazului / 8
3. Hidro- şi aerodinamica / 9
3.1. Curgerea fără frecare internă / 10
3.2. Curgerea prin țevi / 10
3.3. Presiunea în flux / 11
Lucrarea de laborator nr.1 / 14
Studierea curgerii lichidelor prin țevi cilindrice / 14
Lucrarea de laborator nr.2 / 20
Studierea fluxului staţionar de lichid în ţevi / 20
Lucrarea de laborator nr.3 / 26
Studierea debitmetrelor cu dispozitive de strangulare / 26
Lucrarea de laborator nr. 4 / 46
Studierea parametrilor gazului în procese termodinamice / 46
Lucrarea de laborator nr.5 / 61
Verificarea experimentală a ecuației Bernoulli / 61
Lucrarea de laborator nr.6 / 67
Studierea dependenţei debitului lichidului de temperatură şi vâscozitate / 67
Lucrarea de laborator nr.7 / 77
Studierea principiilor de funcționare a contoarelor de gaz şi determinarea caracteristicilor metrologice ale contoarelor de gaz cu pereţi deformabili / 77
Lucrarea de laborator nr.8 / 94

Studierea principiilor de funcționare ale contoarelor de apă şi determinarea caracteristicilor metrologice ale contoarelor de apă caldă / 94

Bibliografie / 104

Anexa 1. Unităţi de măsura a presiunii / 105

Anexa 2. Vâscozitatea cinematică a amestecurilor de gaze în condiţii normale / 105

Anexa 3. Vâscozitatea medie dinamică şi cinematică a apei / 106

Anexa 4. Vâscozitatea dinamică a unor gaze / 106

Anexa 5. Vâscozitatea dinamică a vaporilor de apă / 107

Anexa 6. Coeficienţii de comprimare pentru unele gaze / 107

# PRELIMINARII

În contextul dezvoltării continue a infrastructurii calității și al creșterii exigențelor privind corectitudinea, trasabilitatea și reproductibilitatea măsurărilor, îndrumările metodice pentru lucrările de laborator la unitatea de curs „Măsurări debit gaze și lichide” reprezintă un instrument didactic esențial în formarea profesională a studenților din domeniul Metrologiei și instrumentației virtuale. Aceste îndrumări constituie o componentă integrantă a unității de curs, având rolul de a asigura legătura funcțională dintre fundamentarea teoretică și aplicarea practică a cunoștințelor în cadrul activităților experimentale.

Îndrumările metodice sunt concepute pentru a ghida studenții în realizarea măsurărilor de debit și presiune în gaze și lichide într-un cadru didactic structurat și controlat, care reproduce situații reale de măsurare. Prin parcurgerea lucrărilor de laborator, studenții utilizează diverse mijloace și metode de măsurare, colectează date experimentale, efectuează calcule și analizează rezultatele obținute, dezvoltând abilități esențiale de prelucrare, interpretare și raportare a informației experimentale.

În cadrul unității de curs „Măsurări debit gaze și lichide”, îndrumările metodice integrează principiile și legitățile de bază ale măsurărilor de debit și presiune, aspecte privind evaluarea erorilor, asigurarea calității măsurărilor și respectarea cerințelor metrologice.

*Competențele profesionale* dezvoltate în cadrul cursului sunt:

- Inovare în domeniul metrologie, standardizare, asigurarea calităţii şi evaluarea conformităţii;
- Proiectarea mijloacelor de măsurare, control şi încercare;
- Desfăşurarea activităţilor de evaluare a conformităţii;
- Asigurarea calităţii proceselor de producţie, produselor şi serviciilor;
- Îmbunătăţirea continuă în infrastructura calităţii.

*Rezultatele învăţării* - absolventul/candidatul la atribuirea calificării poate:

- efectua studii a informaţiei ştiinţifică şi tehnică şi propune soluţii inovative şi metode avansate de planificare a activităţilor de proiectare, implementare şi îmbunătăţire în domeniul metrologie, standardizare, asigurarea calităţii, acreditare, evaluarea conformităţii şi supravegherea pieţei;
- formula sarcinii tehnice şi propune soluții hardware și software de proiectare şi omologare a mijloacelor şi sistemelor de măsurare, control şi încercare pentru proiectarea acestora şi participa în echipă la activităţile de cercetare şi dezvoltare;
- efectua verificări metrologice, etalonări, încercări şi activităţi de evaluare a conformităţii cu asigurarea calităţii executării lucrărilor şi raportarea rezultatelor.

Parcurgerea sistematică a lucrărilor de laborator, conform îndrumărilor metodice, stimulează gândirea critică, disciplina profesională și capacitatea de lucru riguros, pregătind studenții pentru activități de măsurare, control și evaluare a conformității în contexte industriale și de cercetare. În acest sens, îndrumările metodice constituie nu doar un suport didactic, ci un cadru formativ complex, care facilitează integrarea cunoștințelor, abilităților și atitudinilor necesare exercitării profesiei în domeniul metrologiei și instrumentației virtuale.

Aceste îndrumări metodice sunt destinate studenților specialității 0710.2 „Metrologie și instrumentație virtuală” și sunt structurate în opt lucrări de laborator, fiecare fiind însoțită de suport metodologic și didactic. Pentru fiecare lucrare sunt stabilite obiectivele, este prezentată fundamentarea teoretică, este descris mersul lucrării, sunt incluse întrebări pentru evaluarea cunoștințelor și este indicată bibliografia aferentă, asigurând astfel coerența și eficiența procesului de învățare practică.

# NOTE TEORETICE GENERALE

## 1. Unități de măsură ale presiunii

Presiune se numește raportul dintre forța ce acționează perpendicular la suprafață şi aria acesteia. Astfel, Presiunea= Forţa/Arie. Dacă p – presiunea, A – aria suprafeţei, F – forţa ce acţionează asupra acestei suprafețe, atunci:

$$p = F/A \quad (1)$$

Presiunea este o mărime scalară. Unitatea de măsură in SI (sistemul internațional) a presiunii: [p] = N/m2 = Pascal (Pa) = kg/(m·s2). Unitatea de măsură extra sistem: bar = 105 Pa. Unități de măsură, utilizate până în anul 1980,: milimetru al coloanei de mercur ( mm col. Hg), atmosfera fizică (atm) = 760 mm col. Hg; atmosfera tehnică (at)= 1kgf/cm2 (1kgf=1kg·g·m/s2, unde g-acceleraţia căderii libere).

**Relaţia dintre unităţile de măsură a presiunii [1,2]:**

Unităţi extrasistem:

| | |
|---|---|
| 1 at | = 0,980665 bar = 98,0665 kPa |
| 1 m col. apă = 0,1 at | = 98,0665 mbar = 9,80665 kPa |
| 1 mm col. apă | = $10^{-4}$ at = 98,0665 μbar = 9,80665 Pa |
| 1 bar | = $10^{5}$ Pa =100 kPa |
| 1 mm. col. Hg | = 1,333224 mbar = 133,3224 Pa |
| 1 atm | = 1,01325 bar = 101, 325 kPa. |

Relaţia detaliată dintre unităţile de măsură a presiunii este prezentată în Anexa 1.

## 2. Presiunea în lichide şi gaze

### 2.1. Presiunea pistonului

Dacă asupra lichidului acționează o presiune exterioară, atunci datorită mobilității moleculelor, această presiune se transmite la fel în toate direcțiile.

Asupra tuturor pistoanelor dintr-o presă hidraulică acționează aceeași presiune. Dar, deoarece suprafețele pistoanelor sunt diferite, forțele care acționează asupra lor nu coincid. Conform formulei (1):

Forțele se raportează după cum se raportează ariile pistoanelor, adică ca pătratul diametrelor pistoanelor:

$$p = F_1/A_1 = F_2/A_2, \text{ sau } F_1/F_2 = A_1/A_2 = (d_1)^2/(d_2)^2$$

Această relație stă la baza funcționării diferitor mecanisme de ridicare (cric, elevator), frânelor hidraulice, convertoarelor de presiune ș.a.

## 2.2. Presiunea coloanei de lichid

În fiecare lichid există o presiune determinată de propria greutate. Astfel, de exemplu, presiunea la baza unei coloane de apă cu înălțimea de 10 m este de circa $10^5$ Pa. Dacă $p$–presiunea în lichid la adâncimea h, $h$ – înălțimea coloanei de lichid, $\rho$ – densitatea lichidului, $g$ = 9,81 m/s$^2$ – accelerația căderii libere, atunci presiunea în lichid este egală cu greutatea lui raportată la arie, $p = G/A = mg/A$, unde $m$ este masa lichidului. Deoarece $m = \rho V$, $V$ – volumul lichidului, $p = \rho V g/A$. Deoarece $Ah = V$, obținem:

$$p = \rho gh \qquad (2)$$

Presiunea la adâncimea dată este aceeași în toate direcțiile. Presiunea sumară, determinată de greutatea coloanei de lichid şi presiunea pistonului, se numește *presiune hidrostatică*.

## 2.3. Presiunea şi volumul gazului

Moleculele gazelor practic nu interacționează una cu alta. Decea gazele nu au formă şi volum determinat şi umplu în totalitate vasul în care se află. În gaz există o anumită presiune care acționează uniform în toate direcțiile. Presiunea gazului la temperatură constantă este proporțională numărului de

molecule ale gazului ce se află în volumul dat, adică masei gazului. Starea gazelor se descrie cu ajutorul *legii Boyle – Mariotte*:

*La temperatură constantă volumul gazului ce se află într-un vas izolat este invers proporţional cu presiunea,* sau

*La temperatură constantă produsul dintre presiunea gazului dintr-un vas izolat şi volumul lui este o mărime constantă,* sau

*La temperatură constantă presiunea şi densitatea gazului ce se află într-un vas izolat sunt direct proporţionale*: p ~ ρ.

În tehnică, deseori se folosește noțiunea de presiune în surplus.

Presiune în surplus se numește diferența dintre presiunea internă (absolută) a gazului şi presiunea atmosferică. Presiunea atmosferică depinde de locul măsurărilor, temperatura aerului şi condițiile meteorologice. La nivelul mării presiunea atmosferică medie anuală este de $\boldsymbol{p_n}$ **= 1013,25 mbar = 101,325 kPa ( presiunea normală)**, la temperatura medie anuală de 15ºC.

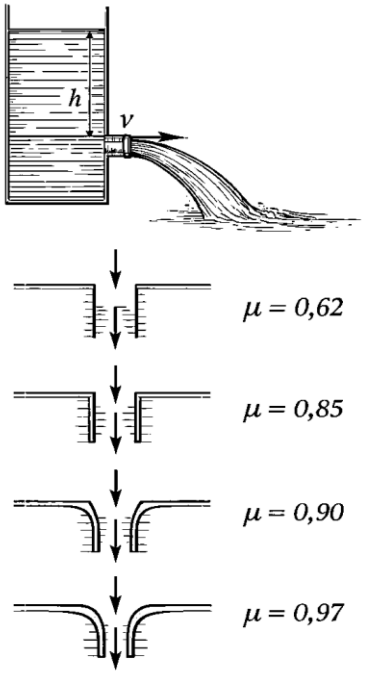



**Fig.1. Coeficientul de scurgere**

# 3. Hidro- şi aerodinamica

Hidro- şi aerodinamica studiază legitățile lichidelor şi gazelor în mișcare. Legitățile mișcării lichidelor sunt valabile şi pentru gaze, cu condiția că viteza fluxului este mai mică decât viteza sunetului, deoarece în acest caz gazele pot fi considerate incompresibile. Mișcarea lichidelor are loc sub acțiunea forței de greutate, diferenței de presiune ş.a.m.d. Viteza fiecărei molecule în fluxul de lichid sau gaz în orice moment de timp are o anumită mărime şi direcție.

Spațiul împlut cu particulele lichidului în mișcare se numește **flux.** Pentru determinarea direcțiilor vitezelor particulelor se folosesc **liniile de curent**. Tangențele la ele în fiecare punct dau direcția de curgere în punctul dat. Aceasta este mai evident atunci când traiectoriile particulelor coincid cu liniile de curent. Așa se întâmplă atunci când liniile de curent își păstrează configurația pe o perioadă lungă de timp, adică în cazul fluxului **staționar.**

## 3.1. Curgerea fără frecare internă

**Lichidul ideal** sau **fluxul ideal** se numește un astfel de lichid sau flux la studierea căruia se poate de neglijat existența frecării interne în lichid şi formării turbulențelor.

Viteza de scurgere a lichidului ideal depinde numai de înălțimea coloanei de lichid din vas. Dacă $v$ - viteza de scurgere a lichidului, $h$- înălțimea coloanei de lichid, $g$ = 9,81 m/s$^2$ – accelerația căderii libere, atunci

$$v = \sqrt{2gh}. \tag{3}$$

Astfel, viteza de scurgere are aceeași mărime ca şi viteza căderii libere de la înălțimea egală cu înălțimea coloanei de lichid.

În realitate viteza de scurgere a lichidelor reale este cu mult mai mică, în special, dacă orificiul are margini ascuțite. Coeficientul ce caracterizează forma orificiului se numește **coeficient de scurgere** μ. Valoarea coeficientului de scurgere este prezentată în Fig.1.

## 3.2. Curgerea prin țevi

Dacă $V$ – volumul lichidului care curge prin secțiunea $A$, $t$ – timpul în decursul căruia curge acest volum, $A$ – aria secțiunii țevii, $v$ – viteza de curgere a lichidului, atunci volumul lichidului scurs se determină din relația:

$$V = Avt \tag{4}$$

Produsul $Av$ se numește **debit de volum** $Q$,

$$Q = Av = V/t \quad (5)$$

Valoarea momentană a debitului de volum se determină din formula:

$$Q = dV/dt. \quad (6)$$

Unitatea de măsură în SI a debitului: $[Q] = [V]/[t] = m^3/s$.

Din formula (5) rezultă că prin orice secțiune a țevii, în intervale egale de timp *t*, trebuie să curgă volume egale *V*, deoarece lichidul practic este incompresibil. De aceea, printr-o secțiune cu aria mai mică lichidul curge mai repede şi invers.

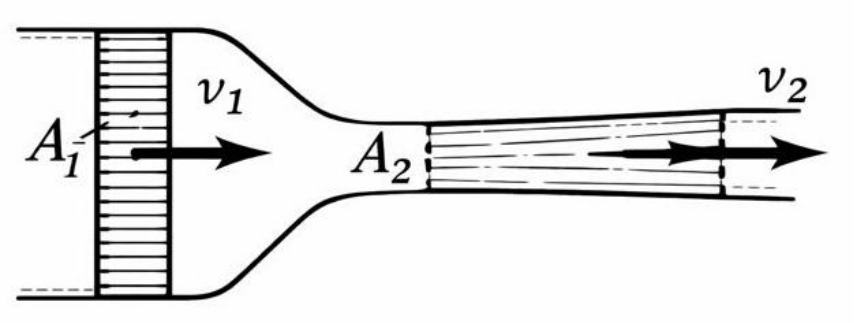



**Fig. 2. Curgerea prin țevi**

Dacă (vezi Fig.2) $A_1$ – aria secțiunii 1, $A_2$ – aria secțiunii 2, $v_1$ – viteza fluxului în secțiunea 1, $v_2$ – viteza fluxului în secțiunea 2, atunci ecuația fluxului (ecuația de continuitate) are forma:

$$A_1v_1 = A_2v_2, \text{ sau } Av = const. \quad (7)$$

Prin urmare aria secțiunii este invers proporțională cu viteza $A \sim 1/v$.

## 3.3. Presiunea în flux

**Presiunea în flux** se compune din presiunea statică şi dinamică. **Presiunea statică** este determinată de energia potențială a lichidului, aflat sub presiune. **Presiunea dinamică** este determinată de energia cinetică a lichidului în mișcare.

La creșterea vitezei fluxului componenta dinamică a presiunii crește, iar cea statică se micșorează (vezi Fig.3). În lichidul aflat în repaus presiunea dinamică este egală cu zero, iar presiunea totală este egală cu cea statică, adică cu presiunea hidrostatică. care se compune din presiunea creată de piston şi presiunea creată de coloana de lichid.

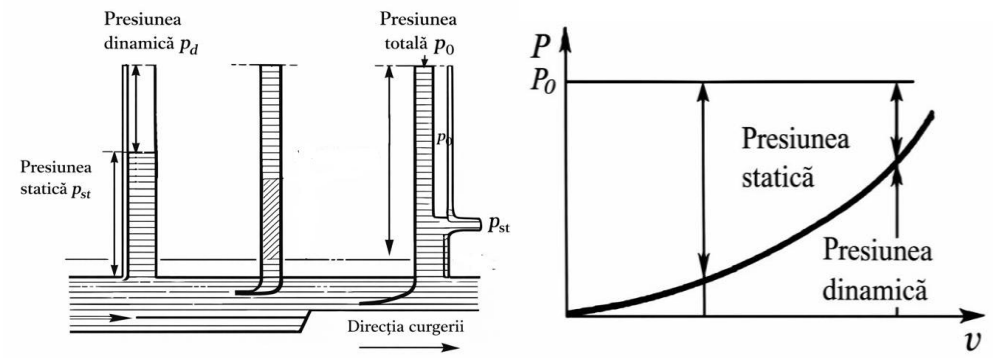



**Fig. 3. Presiunea în flux**

**Legea lui Bernoulli**:

*Într-un flux staţionar suma presiunii statice şi dinamice rămâne constantă. Această sumă corespunde presiunii hidrostatice în lichidul imobil.*

Dacă lichidul curge printr-o țeavă înclinată, atunci trebuie de luat în considerație variația de energie cauzată de înclinarea țevii.

Dacă $p_1$ – presiunea statică în secţiunea 1, $p_2$ – presiunea statică în secţiunea 2, $v_1$ – viteza fluxului în secţiunea 1, $v_2$ – viteza fluxului în secţiunea 2, $h_1$ – înălţimea secţiunii 1 faţă de un nivel ales arbitrar, $h_2$ – înălţimea secţiunii 2 faţă de un nivel ales arbitrar, $p_0$ – presiunea totală, $\rho$ – densitatea lichidului, atunci lucrul $W$, consumat la variaţia vitezei $v$ şi înălţimii $h$ a lichidului, este egală cu suma variaţiei energiei potenţiale $\Delta W_p$ şi variaţiei energiei cinetice $\Delta W_c$, adică $W = \Delta W_p + \Delta W_c$.

Pentru un element de volum $\Delta V$ avem:

$W = F\Delta s = pA\Delta s = p\Delta V$ ($\Delta s$ – deplasarea), de unde:

$$(p_1 - p_2)\,\Delta V = mg(h_2 - h_1) + m((v_2)^2 - (v_1))^2/2.$$

Împărțind la $\Delta V$ , ceia ce se permite, deoarece volumul rămâne neschimbat, datorită incompresibilității lichidelor, obținem:

$$p_1 - p_2 = \rho\, gh_2 - \rho\, gh_1 + \rho\,((v_2)^2 - (v_1))^2/2.$$

Trecând termenii cu aceeași indici într-o parte, obținem **ecuația lui Bernoulli:**

$$p_1 + \rho\, gh_1 + \rho(v_1)^2/2 = p_2 + \rho\, gh_2 + \rho\,(v_2)^2/2,$$

$$p + \rho\, gh + \rho\, v^2/2 = p_0 = const. \qquad (8)$$

Suma presiunii statice *p,* presiunii determinate de înălțimea coloanei de lichid $\rho gh,$ şi presiunii dinamice $\rho\, v^2/2$ rămâne constantă dea lungul liniei de curent. Formula (8) este valabilă numai pentru lichidele ideale, în care lipsește frecarea.

Dacă lichidul curge practic la aceeași înălțime, atunci formulele (8) se simplifică:

$$p_1 + \rho(v_1)^2/2 = p_2 + \rho\,(v_2)^2/2,$$

$$p + \rho\, v^2/2 = p_0 = const. \qquad (9)$$

**Lista bibliografică:**


1. Монахов В.И. *Измерение расхода и количества жидкости, газа и пара*. Ленинград: Метрология, 1972, 314стр.
2. Кухлинг Х. *Справочник по физике*. Москва: Мир, 1982, 519 стр.

# Lucrarea de laborator nr.1

## Studierea curgerii lichidelor prin țevi cilindrice

| Abilități | Responsabilitate și autonomie |
|---|---|
| – să cunoască metode de măsurare a presiunii și tipurile de presiune;<br>– să utilizeze diferite metode de măsurare a presiunii;<br>– să definească curgerea laminară şi turbulentă a lichidelor;<br>– să deducă formula lui Poiseuille;<br>– să cunoască sensul fizic al coeficientului de rezistenţă şi al numărului Raynolds;<br>– să determine experimental caracterul curgerii lichidelor, coeficientul de rezistenţă şi numărul Raynolds. | Absolventul autonom efectuează studiul realizărilor ştiinţei şi tehnicii, stabileşte şi testează ipotezele de lucru şi prelucrează datele experimentale fiind responsabil pentru corectitudinea prelucrării datelor și rezultatele obținute. |

**Obiectivele lucrării:**

1.Studierea diferitor tipuri de curgere a lichidelor pe exemplul apei;

2. Determinarea dependenței coeficientului de rezistență de mărimile ce caracterizează curgerea.

**Aparate şi accesorii***:* 1. instalația experimentală, 2. vase calibrate, 3. termometru, 4. cronometru, 5. hârtie milimetrică.

### Note teoretice

La mișcarea tuturor fluidelor se observă două regimuri stabile de curgere: **laminar** și **turbulent.**

Curgerea lichidului în care este prezentă frecarea internă (vâscozitatea), dar fără formarea turbulențelor, se numește *laminară.* La curgerea laminară, diferite straturi ale fluidului, se mișcă cu diferite viteze. Nemijlocit la peretele vasului viteza de curgere a lichidului este egală cu zero, iar pe axa țevii este

maximală. De aceea, pentru calcularea volumului fluidului ce curge prin țeavă în intervalul de timp $t$ , nu se poate de utilizat formula (4). În acest caz volumului fluidului $V$ se determină cu ajutorul formulei lui Poiseuille:

$$V = (\pi \Delta p t R^4)/(8\eta l), \qquad (1.1)$$

unde $R$ – raza țevii (cu pereții netezi), $\Delta p$ – diferența de presiune la capetele țevii, $l$ - lungimea țevii, $\eta$ – viscozitatea dinamică a fluidului (coeficientul de frecare internă).

Când viteza fluxului întrece o anumită mărime critică fluidul începe să se miște *turbulent*. Apar turbulențe şi, prin urmare, forțe ce se opun curgerii. Rezistența în flux (rezistența hidraulică), adică forța ce acționează asupra corpului aflat în flux, se compune din diferența de presiune înainte de corp şi după el şi forțele de frecare de la suprafața corpului.

Rezistența hidraulică $F$ se determină din relația

$$F = pA = cA(\rho/2)v^2, \qquad (1.2)$$

unde $c$ – un coeficient adimensional (**coeficient de rezistență**), ce depinde de forma corpului, $A$- aria secțiunii maximale a corpului în planul perpendicular direcției fluxului, $v$ –viteza relativă a mișcării corpului în mediu. Coeficientul $c$ se determină experimental şi depinde de viteză şi proprietățile mediului în care are loc mișcarea. El este funcție de **numărul Raynolds** $Re$ (o mărime adimensională), care este cea mai importantă caracteristică a curgerii unui mediu vâscos şi este determinat de raportul dintre forțele de inerție şi forțele de vâscozitate a substanței în țeavă.

$$Re = \tilde{l}\,\rho v/\eta = \tilde{l}\,v/\tilde{\nu} \quad , \qquad (1.3)$$

unde $\tilde{l}$ – dimensiunile caracteristice ale corpului (raza bilei, raza țevii ş.a.), $\tilde{\nu}$ - viscozitatea cinematică ($\tilde{\nu} = \eta/\rho$ ). La viteză mică, adică pentru număr Raynolds mic, curgerea oricărui fluid va fi laminară. Dacă viteza crește şi atinge valoarea critică $v_{cr}$ (respectiv numărul Raynolds critic $Re_{cr}$), atunci curgerea

laminară se transformă în turbulentă, rezistența hidraulică crește considerabil. Valoarea critică a numărului Raynolds pentru fluxul din ţevi netede este $Re_{cr} \approx 1160$. Această valoare depinde de starea suprafețelor țevilor şi condițiile de curgere.

Diferența de presiune $\Delta p$ dintre capătul ţevii şi o anumită secţiune a ei poate fi măsurat cu manometru cu lichid

$$\Delta p = \rho g h \tag{1.4}$$

unde $\rho$ – densitatea lichidului manometric, $h$ – înălțimea coloanei de lichid în manometru.

Debitul fluidului poate fi determinat din relaţia

$$Q = \pi r^2 v, \tag{1.5}$$

unde $r$ – raza interioară a ţevii.

Măsurarea concomitentă a mărimilor $\Delta p$ şi $Q$ permite atingerea obiectivelor lucrării.

Din ecuațiile (1.3) – (1.5) obținem

$$\mathrm{Re} = Q/(\pi \tilde{v} r). \tag{1.6}$$

Luând în consideraţie dimensiunea ţevii, diferenţa de presiune necesară compensării forţelor de frecare poate fi prezentată în forma

$$\Delta p = cl\rho/(2rv^2), \tag{1.7}$$

unde $l$ – lungimea țevii.

Folosind această ecuație se poate de determinat mărimea coeficientului de rezistență pentru curgerea laminară. Astfel, din ecuațiile (1.6), (1.7) şi (1.1) obținem:

$$c = 16/Re \tag{1.8}$$

iar din ecuațiile (1.4) şi (1.1)

$$h/Q = 8 \eta l / (\pi r^4 \rho g) \tag{1.9}$$

Ecuațiile (1.8) şi (1.9) sunt valabile numai pentru curgerea laminară. Mărimea coeficientului de rezistență pentru curgerea turbionară se determină din relația empirică

$$c = 0{,}133/(Re)^{1/4} \quad . \qquad (1.10)$$

## Descrierea instalației [1]

Trei țevi cilindrice din alamă, cu o suprafață interioară netedă, de diametru diferit sunt montate pe un banc din oțel şi fixate în poziție orizontală. Parametrii țevilor sunt indicați pe instalație: *l* – lungimea şi *r* – raza interioară a țevii. Apa intră în țeavă prin capătul *B* (Fig.1.1 ) şi se scurge prin capătul *A* într-un vas calibrat *D*. Timpul de curgere a apei în vas se determină cu ajutorul cronometrului, temperatura apei – cu termometru *T*. Țeava din sticlă *C* servește ca manometru. Înălțimea *h* a apei din ea se măsoară după scala *M* şi determină diferența de presiune pe lungimea *l*, calculată conform formulei (1.4) (în Fig. 1.1 este prezentată o singură țeavă, pentru celelalte două măsurările se efectuează analogic).

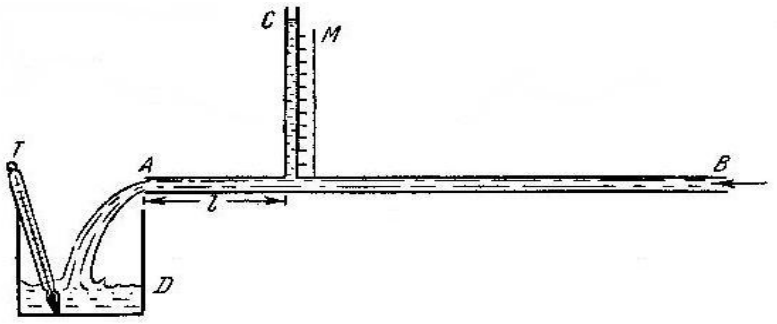



**Fig.1.1. Instalația experimentală**

## Mersul lucrării

1. Măsurați înălțimea *h* a nivelului apei în manometru şi debitul ei *Q* (*Q* = *V*/*t*, *V* – volumul apei din vasul calibrat, *t* – timpul înregistrat de cronometru) pentru viteze diferite ale fluxului în toate țevile. Efectuați măsurările pentru zece debite diferite ale fluxului (viteze diferite) în fiecare țeavă consecutiv. Debitele diferite se obțin deschizând robinetul, montat în punctul *B*, până la diferite poziții, indicate pe banc. Rezultatele măsurărilor le introduceți într-o tabelă.

Efectuați măsurările îngrijit: conectați cronometru în momentul când vasul calibrat este pus sub jetul de apă şi deconectați-l în momentul când el este înlăturat. Pentru debite mici (valori mici ale $h$ şi $r$ ($r$ – raza ţevii) timpul de colectare a apei trebuie mărit. Aveţi grijă ca fluxul să fie staționar, adică nivelul apei în manometru pe parcursul unui experiment să nu se deplaseze.

2. Prezentați grafic rezultatele măsurărilor pentru toate țevile. Pe axa absciselor depuneți mărimea determinată a înălțimii $h$, care este direct proporțională cu diferența de presiune ($\Delta p = \rho g h$), pe axa ordonatelor –debitul $Q$. Scara pentru toate țevile trebuie să fie una şi aceeași, punctele experimentale pentru fiecare țeavă, le notați diferit (pentru a nu le confunda).
3. Pentru valori mici ale înălțimii $h$ (curgerea laminară) graficele (pentru toate țevile) trebuie să poarte un caracter liniar, iar unghiul de înclinare al dreptei $\alpha$ se determină de ecuația (1.9).
4. Găsind grafic $tg\ \alpha = h/Q$ şi cunoscând parametrii țevii, calculați conform ecuației (1.9) coeficientul de vâscozitate al apei $\eta$ şi comparați-l cu valoarea tabelară corespunzătoare temperaturii apei.
5. Odată cu creșterea vitezei apei curgerea laminară se va transforma în turbulentă, iar graficul dependenței studiate nu va mai fi linear. Astfel numai regiunile de început ale graficelor vor fi lineare.
6. Construiți aparte, utilizând ecuația (1.9), graficele corespunzătoare teoretice şi comparați-le cu regiunile de început ale graficelor experimentale. Această comparație vă va permite să evaluați corectitudinea măsurărilor efectuate.
7. Din graficul experimental, pentru fiecare țeavă, determinați debitul critic pentru care curgerea se transformă din laminară în turbulentă şi analizați dependența acestei valori de parametrii țevii.
8. Cunoscând valoarea debitului, calculați viteza critică $v_{cr}$, conform formulei (1.5) şi, respectiv, numărul Raynolds critic $Re_{cr}$ , conform formulei (1.6),

pentru fiecare țeavă şi comparați-le. Analizați dependența datelor obținute în funcție de starea suprafețelor țevilor şi condițiile de curgere.

9. Prezentați rezultatele măsurărilor pentru toate cele trei țevi nu prin trei curbe, ci prin una singură. Aceasta se poate de efectuat, dacă construiți graficul pentru mărimile adimensionale şi anume, graficul dependenței $c = f(Re)$. Valoarea lui Re se calculează după formula (1.6), iar valoarea lui $c$ - conform formulei (1.7), unde $v$ se determină din relația (1.3).

   Pentru curgerea laminară toate punctele experimentale trebuie să se afle (în limitele erorilor măsurărilor) pe una şi aceeași dreaptă, descrisă de ecuația (1.8). Convingeți-vă, că pentru curgerea turbulentă, graficul obținut este aproape de curba descrisă de ecuația (1.10).
10. Determinaţi eroarea relativă şi absolută pentru $h$ şi $Q$.
11. Analizați rezultatele obținute în lucrare şi formulaţi concluzii.

**Întrebări pentru evaluarea cunoştințelor**

1. Care este deosebirea dintre curgerea laminară şi cea turbulentă a unui fluid?
2. De ce la curgerea laminară volumului fluidului se determină cu ajutorul formulei lui Pouaseille?
3. Din ce cauză apare rezistența hidraulică?
4. De ce depinde coeficientul de rezistență şi numărul Raynolds?
5. Descrieți instalația experimentală.
6. Deduceți expresiile (1.6) –(1.9).
7. Explicați sensul fizic al numărului Raynolds critic $Re_{cr.}$

**Lista bibliografică:**

1. Механика и молекулярная физика: *Физический практикум. Под редакцией Иверонової В.И.* Москва: Наука, 1967, 352стр.

# Lucrarea de laborator nr.2

## Studierea fluxului staţionar de lichid în ţevi

| Abilități | Responsabilitate și autonomie |
|---|---|
| – Să aplice metode de măsurare a presiunii și tipurile de presiune;<br>– Să utilizeze diferite metode de măsurare a presiunii.<br>– să descrie diferite tipuri de debitmetre;<br>– să cunoască metodele de calculare ale debitului;<br>– să utilizeze debitmerele de diferit tip;<br>– să definească presiunea dinamică, presiunea statică şi presiunea totală;<br>– să deducă Ecuaţia Bernoulli;<br>– să cunoscă construcţia debitmetrului Venturi si a debitmetrului Pitot;<br>– să determine experimental caracterul curgerii lichidelor şi numărul Raynolds. | Absolventul autonom efectuează studiul realizărilor ştiinţei şi tehnicii, stabileşte și testează ipotezele de lucru și prelucrează datele experimentale fiind responsabil pentru corectitudinea prelucrării datelor și rezultatele obținute. |

**Obiectivele lucrării:**

1. Verificarea ecuației Bernoulli cu ajutorul debitmetrelor Venturi şi Pitot;
2. Determinarea numărului Re şi a caracterului de curgere a lichidului.

**Aparate şi accesorii***:* Instalația debitmetrică ( Fig.2.1); cronometru.

În lucrare se studiază mișcarea staționară a apei printr-o țeavă orizontală de secțiune circulară. Curgerea staționară a fluidului ideal se descrie cu ajutorul ecuației Bernoulli (9).

### Note teoretice şi descrierea instalației experimentale [1]

Schema instalației ce se folosește la studierea fluxului, este prezentată în Fig. 2.1. Apa nimerește în țeava *T* din rezervorul *I*, prevăzut cu tub din sticlă *B*. Umplerea rezervorului se efectuează din conducta de apă prin ţeava *A* şi se

reglează cu robinetul *K*. Apa ce se scurge din țeava *T* nimerește în rezervorul de colectare *II* pe fundul căruia este montat sifonul *C*.

Sifonul nu permite umplerea rezervorului mai sus de înălțimea *h,* deoarece în acest caz, el automat varsă din rezervor apa. Țeava *T* este prevăzută cu debitmetrele Venturi şi Pitot.

*Debitmetru Venturi* (Fig. 2.1) prezintă o ţeavă orizontală cilindrică care îşi schimbă lent secţiunea. În secțiunea mare (secţiunea A1) şi cea mică (secţiunea A2) sunt făcute ieşiri spre ţevile
manometrului cu apă M1.

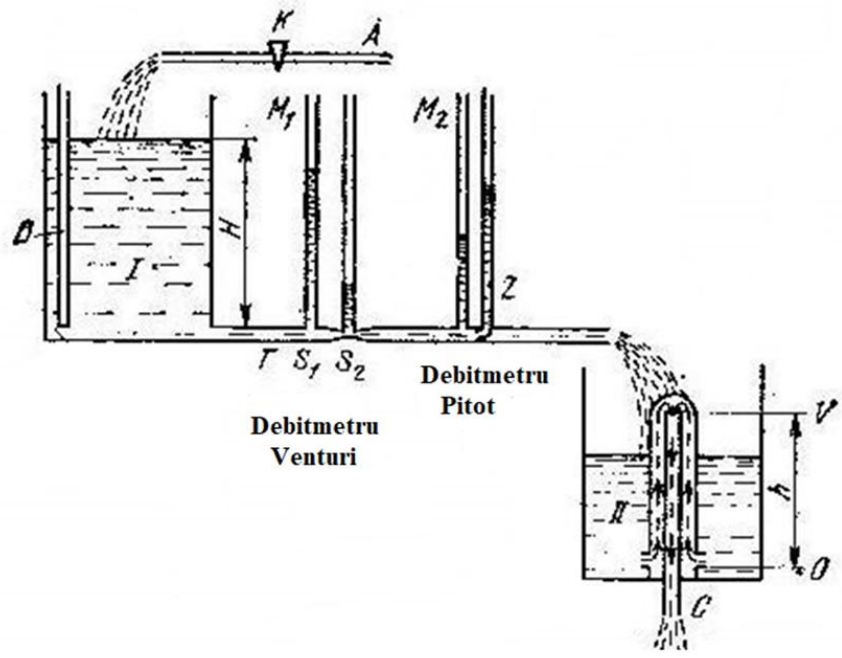



**Fig. 2.1. Instalația debitmetrică**

Înălțimea la care se ridică apa în brațele manometrului determină presiunea statica din secțiunile corespunzătoare (respectiv diferența de presiune statică). Cunoscând diferența de presiune se poate de determinat viteza fluxului. Din ecuația de continuitate (7), găsim că volumul lichidului ce trece prin $A_1$ şi $A_2$ într-o unitate de timp, este același, adică

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \qquad (2.1)$$

Substituind expresia (2.1) în (9) obținem formula ce determină viteza fluxului în țeavă, exprimată prin presiunea apei în secțiunile $A_1$ şi $A_2$:

$$v_1 = \{2(p_1 - p_2)/\rho[(A_1/A_2)^2 - 1]^{-1}\}^{1/2} . \qquad (2.2)$$

*Debitmetrul Pitot* este prezentat în Fig. 2.1 La țeava studiată sunt unite două brațe ale manometrului $M_2$. Una din ele (1) este unită la secțiunea mare a țevii $T$ , unde lichidul se mișcă cu viteză constantă $v_1$, iar alta (2) este îndoită şi orientată cu capătul deschis în întâmpinarea fluxului. În faţa secțiunii țevii (2) lichidul este imobil, $v_2 = 0$. Brațul (2) măsoară presiunea totală a fluxului $p_0$, iar brațul (1) cea statică $p$, astfel, diferența dintre nivelele brațelor este egală cu presiunea dinamică. Din ecuația Bernoulli (9) obținem: $p + \rho(v_1)^2/2 = p_0$, de unde:

$$v_1 = \{2(p_0 - p)/\rho\}^{1/2} . \qquad (2.3)$$

Ecuația (2.3) permite de a determina viteza lichidului cunoscând diferența de înălțimi din brațele manometrului $M_2$.

Debitmetrele Venturi şi Pitot permit de a studia aplicabilitatea ecuației Bernoulli referitor la mișcarea lichidului în țeavă. Viteza apei în țeavă poate fi măsurată nemijlocit, cunoscând timpul în decursul căruia jetul umple rezervorul *II*.

Pe de altă parte, viteza poate fi calculată din formulele (2.2) şi (2.3). Compararea valorii măsurate şi celei calculate poate servi drept criteriu de verificare a aplicării ecuației Bernoulli.

Ecuația Bernoulli se deduce presupunând că lichidul este incompresibil şi nu are vâscozitate. Prima presupunere se respectă pentru vitezele din experiment, iar valabilitatea celei de a doua presupuneri trebuie studiată în mod special. Acțiunea vâscozității poate fi neglijată dacă pierderea de energie $E_f$ , determinată de frecare este cu mult mai mică ca energia cinetică a lichidului $E_c$.

Raportul $E_c/ E_f$ este proporțional cu numărul Re, valoarea căruia determină caracterul curgerii fluidului.

În metoda Venturi şi Pitot viteza lichidului se măsoară după deferența de presiune în brațele vecine ale manometrului. Această diferență poate să depindă de viscozitate, acțiunea căreia duce la micșorarea presiunii dea lungul țevii. Pentru a micșora eroarea determinată de acest proces, țevile manometrelor se amplasează aproape una de alta.

Veridicitatea formulelor (2.2) şi (2.3) poate fi verificată după caracterul dependenței mărimilor măsurate ale vitezelor $v_v$ (viteza măsurată cu debitmetrul Venturi) şi $v_p$ (viteza măsurată cu debitmetru Pitot) de viteza $v$ determinată nemijlocit (după timpul de umplere a vasului calibrat II). Astfel de comparare este comod de efectuat prin metoda grafică. Se construiesc graficele dependenței $v_v$ şi $v_p$ de viteza $v$. Punctele experimentale trebuie să se afle pe o dreaptă ce trece prin originea sistemului de coordonate.

Măsurarea debitului lichidului se efectuează pentru 6-8 valori ale vitezei fluxului. Viteza apei în țeavă se determină de presiunea dinamică, adică de înălțimea $H$ a nivelului apei în rezervorul I. Valoarea stabilă a lui $H$ se reglează cu robinetul $K$. Înainte de efectuarea măsurărilor trebuie să ne convingem că nivelul apei se păstrează destul de stabil. Înălțimea $H$ se măsoară după scala milimetrică situată alături de țeava $B$.

## Mersul lucrării

1. Pentru fiecare presiune $H$ măsurați valoarea reală a vitezei fluxului $v$ după timpul $t$ de umplere a unui volum $V$ în rezervorul $II$:

$$v = V/tA \tag{2.4}$$

Mărimea ariei $A$ şi a volumului $V$ (care se determină de înălțimea $h$ dintre două gradații de pe peretele rezervorului $II$) sunt indicate pe instalație. Timpul

de umplere t se măsoară cu cronometrul. Apreciați eroarea $\Delta v$ a mărimii vitezei măsurate nemijlocit.

2. Cu ajutorul datelor obținute construiți graficul dependenței pătratului vitezei $v^2$ de înălțimea (presiunea) $H$.

Determinați şi însemnați pe grafic erorile absolute $\Delta(v^2)$ şi $\Delta H$.

3. Pentru fiecare presiune luați indicațiile manometrelor din debitmetrele Venturi $(p_1 - p_2)_v$ şi Pitot $(p - p_0)_p$ şi calculați cu ajutorul formulelor (2.1),(2.2) valorile corespunzătoare ale vitezelor $v_v$ şi $v_p$. Introduceți datele în tabelă. Determinați erorile absolute ale $\Delta v_v$ şi $\Delta v_p$. Comparați mărimile calculate ale vitezelor cu valoarea reală a vitezei $v$. Pentru aceasta prezentați rezultatele obținute pe graficele $v_{v,}\, v$ şi $v_{p,}$ v. Cum vor influența caracterul graficelor construite erorile de măsurare a ariilor $A_1$ şi $A_2$ şi, de asemenea, îngustarea secțiunii în regiunea unde este sudată ţeava 2 a debitmetrului Pitot.

4. Pentru fiecare valoare măsurată a vitezei calculați numărul Re. Cu ajutorul numărului Re determinați caracterul curgerii (laminar sau turbulent).

**Întrebări pentru evaluarea cunoștințelor**

1. Cu ajutorul ecuației de continuitate (7) deduceți ecuația Bernoulli (9).
2. Descrieți instalația experimentală.
3. Explicați construcția debitmetrelor Venturi şi Pitot. Care mărimi fizice se măsoară cu ajutorul acestor aparate?
4. Prin ce metodă se verifică dacă ecuația Bernoulli poate fi aplicată în condițiile experimentului dat?
5. De ce este determinată viteza de curgere a apei din sifon? Explicați funcționarea sifonului.
6. Din ce cauză curgerea apei prin țeavă se descrie cu ajutorul ecuației Bernoulli (valabilă pentru lichide ideale), iar curgerea aerului printr-o astfel de ţeavă se descrie cu ajutorul ecuației Pouaseile, folosită la descrierea

fluidelor vâscoase, în acelaşi timp, viscozitatea apei e mai mare ca a aerului? ($\eta_{apei} = 1{,}0004 \cdot 10^{-3}$ Pa·s, $\eta_{aerului} = 1{,}81 \cdot 10^{-5}$ Pa·s).

7. Deduceţi formulele (2.1) şi (2.2).

**Lista bibliografică:**

1. Лабораторные занятия по физике. Под редакцией Гольдина Л.Л. Москва: Наука, 1983, 704 с.

# Lucrarea de laborator nr.3

## Studierea debitmetrelor cu dispozitive de strangulare

| Abilități | Responsabilitate și autonomie |
|---|---|
| - Să utilizeze diferite metode de măsurare a presiunii.<br>- să descrie diferite tipuri de debitmetre;<br>- să cunoască metodele de calculare ale debitului;<br>- să utilizeze debitmerele de diferit tip;<br>- sa aplice prevederile actelor legislative și normative nationale în domeniul verificării, încercării si controlului debitului;<br>- să numească debitmetrele cu dispozitiv de strangulare;<br>- să cunoască principiul de funcţionare a debitmetrelor cu dispozitiv de strangulare;<br>- să efectuze algoritmul de calcul al unui dispozitiv de strangulare pentru diferite fluide, ţevi şi condiţii de funcţionare, parametri fizici ai fluidului: presiune, temperatură şi umiditate;<br>- să aleagă dispozitivul de strangulare reeşind din proprietăţile fluidului, condiţiile de funcţionare ale debitmetrului şi cerinţele de exploatare;<br>- să recomande manometrul diferenţial, care este potrivit pentru condiţiile date. | - Absolventul autonom efectuează studiul realizărilor ştiinţei şi tehnicii, stabileşte şi testează ipotezele de lucru şi prelucrează datele experimentale fiind responsabil pentru corectitudinea prelucrării datelor și rezultatele obținute.<br>- Absolventul participă la efectuarea autonomă a verificărilor metrologice, etalonărilor, încercărilor de laborator şi la activităţile de evaluare a conformităţii fiind responsabil de calitatea lucrărilor efectuate. |

**Obiectivele lucrării:**

1. Studierea principiului de funcționare a debitmetrelor cu dispozitiv de strangulare;
2. Efectuarea calculelor unui dispozitiv de strangulare pentru diferite fluide, ţevi şi condiții de funcționare, parametri fizici ai fluidului: presiune, temperatură şi umiditate;

3. Alegerea dispozitivului de strangulare reieșind din proprietățile fluidului, condițiile de funcționare ale debitmetrului şi cerințelor de exploatare;
4. Recomandarea manometrului diferențial, care este potrivit pentru condițiile date.

**Note teoretice. Caracteristica generală a debitmetrelor cu dispozitive de strangulare [1,2]**

**Debitmetrele cu dispozitiv de strangulare** permit de a măsura debitul fluidelor în ţevi circulare orizontale, oblice şi verticale. Aceste debitmetre se utilizează pe larg datorită următoarelor avantaje:

- Exactitatea destul de înaltă;
- Metoda de măsurare este comodă şi universală;
- Posibilitatea măsurării oricăror debite a lichidelor, vaporilor şi gazelor care se află la diferite temperaturi şi presiuni;
- Simplitatea confecționării în serie a acestor aparate;

Dezavantajele lor:

- Are loc pierderea energiei fluxului;
- Dificultatea aplicării pentru debite mici, în fluxuri pulsante şi în fluxurile substanțelor cu impurități.

Complexul debitmetric constă din:

1. Dispozitivul de strangulare;
2. Țevi de conexiune şi instalații auxiliare;
3. Manometru diferențial.

Principiul de funcționare al acestor debitmetre poate fi redat prin schema din Fig.3.1:

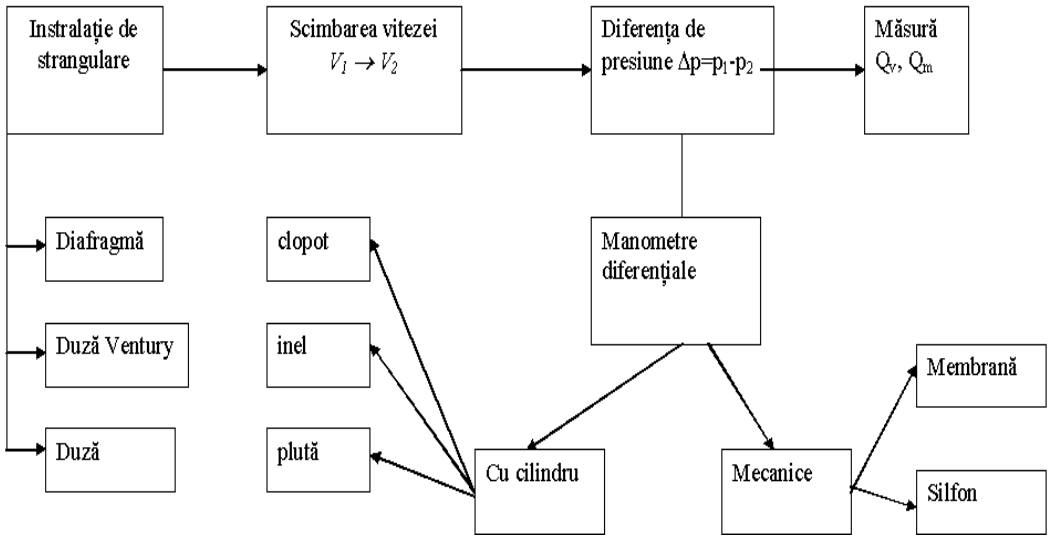



**Fig. 3.1. Schema principiului de funcționare a debitmetrelor**

**Dispozitivul de strangulare (DS)** se instalează în țeavă şi creează o îngustare a fluxului de substanță, ca rezultat viteza crește, ceea ce duce la mărirea presiunii dinamice, respectiv presiunea staționară se micșorează, astfel apare o diferență de presiune, până la DS $p_1$ şi după el $p_2$. Diferența de presiune $\Delta p = p_1 - p_2$ depinde de viteza fluxului, respectiv şi de debit (vezi formula (5)). Deci deferența de presiune servește drept măsură a debitului.

$Q_v$ şi $Q_m$ – debitele de volum şi de masă, iar deferența de presiune se măsoară cu ajutorul manometrelor diferenţiale, care sunt de mai multe tipuri (vezi Fig.3.1). Debitele de volum şi de masă se calculează conform relaţiilor

$$Q_v = c\alpha\varepsilon\, d^2 \sqrt{\Delta P / \rho}\ ;\ Q_m = c\,\alpha\varepsilon d^2\ ,. \qquad (3.1)$$

unde c = 1,252·10$^{-2}$, $\alpha = \mu\xi / \sqrt{1-\mu^2 \cdot m^2}$ - coeficientul de debit, care depinde de forma geometrică a țevii, DS, forțele de frecare dintre substanță şi țeavă, şi de vâscozitatea substanței (se determină experimental), μ - coeficientul de

strangulare a jetului, care depinde de tipul şi construcția dispozitivului de strangulare, $\xi$ - coeficientul de corecție ce depinde de viscozitatea fluidului şi de calitatea prelucrării suprafeței interioare a țevii, numărul *m* - suprafața relativă a orificiului DS $m=F_0/F_1=d^2/D^2$, $F_0$, *d*-aria şi, respectiv, diametrul orificiului instalației de strangulare, $F_1$, *D*-aria şi, respectiv, diametrul interior al ţevii. ε - factorul de corecţie la dilatarea fluidului, el se introduce din cauza că densitatea fluidului se schimbă la trecerea prin instalaţia de strangulare şi se determină experimental.

Deosebim trei tipuri de DS: diafragme, duze şi duze Venturi. **Diafragma** este un disc subțire cu orificiu circular, centrul căruia coincide cu centrul țevii (vezi Fig.3.2).

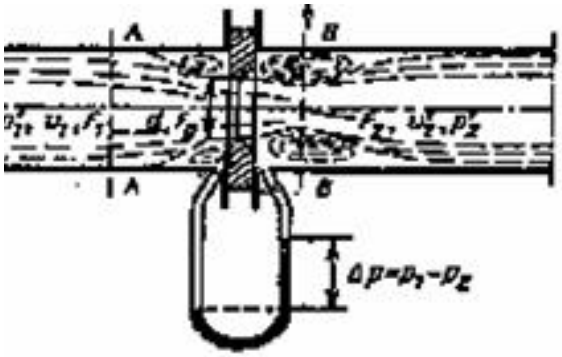



**Fig.3.2 Diafragmă**

Strangularea fluxului începe până la diafragmă şi are valoarea minimală după diafragmă, aria secțiunii minime a fluxului este $F_2$. După trecerea prin diafragmă presiunea nu se restabilește complet şi apare o pierdere de presiune. La trecerea substanței prin diafragmă, după ea, în colțuri, se formează o zonă moartă *BB*, în care, datorită diferenței de presiune $\Delta p$, apar fluxuri de sens invers. Din cauza vâscozității, fluxurile directe şi inverse se unesc şi

formează turbulențe, care creează pierderi de energie, respectiv şi pierderi de presiune.

**Duza** (vezi Fig.3.3) are formă de pâlnie cu un orificiu rotund concentric. Partea de intrare se îngustează lent, iar cea de ieșire prezintă un cilindru cu diametrul constant. În duze turbulențele sunt mai mici, deoarece secțiunea minimă a fluxului se formează la ieșirea din duză, $F_0=F_2$, respectiv, pierderile de presiune sunt mai mici ca la diafragme.

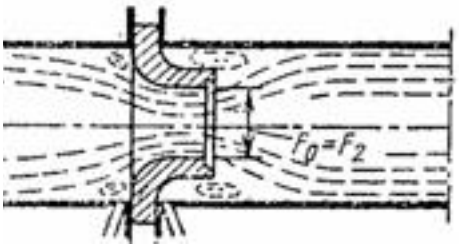



**Fig.3.3.Duză**

**Duza Venturi** (vezi Fig.3.4) constă din trei părţi : partea de intrare care se îngustează lent, partea cilindrică din mijloc şi partea conică de ieșire care se lărgește lent (difuzorul). Din caua părții conice la ieșire pierderile de presiune sunt foarte mici.

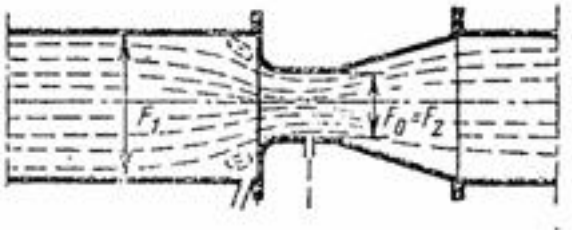



**Fig. 3.4 Duza Venturi**

**Metoda de calcul a dispozitivelor de strangulare**

Debitmetrele cu DS se folosesc cu respectarea următoarelor condiții:

1) Substanța măsurată umple toată secțiunea transversală a conductei;

2) Fluxul substanței este staționar, adică viteza fluxului şi presiunea practic nu se schimbă în timp pentru locul dat al conductei;
3) Starea de agregare a substanței nu trebuie să se schimbe la trecerea ei prin DS.

A calcula un dispozitiv de strangulare presupune:

- Alegerea tipului DS;
- Determinarea diametrului DS;
- Determinarea pierderilor de presiune din cauza DS;
- Alegerea manometrului diferențial, a scării lui şi a limitei superioare de măsurare;
- Determinarea erorii relative a măsurării debitului;
- Determinarea lungimii minime a sectoarelor rectilinii ale conductelor până la şi după DS.

Pentru a calcula un DS trebuie să cunoaștem următorii parametri:

- parametrii mediului măsurat (densitatea, presiunea, temperatura, vâscozitatea, iar pentru gaze, suplimentar, componența şi umiditatea relativă);
- caracterul substanței măsurate (agresivitatea, prezența diferitor impurități: praf în gaz, particule solide în lichid ş.a.);
- debitele maximale, minimale şi medii $Q_{max}$ , $Q_{min}$ ,$Q_{med}$ ;
- diametrul interior al conductei la temperatura de 20˚C;
- schema sectorului conductei pe distanța *100D*, înainte de DS şi *5D*, după instalația de strangulare (*D*- diametrul interior al conductei);
- pierderile tolerate de presiune datorită DS pentru $Q_{max}$ ;
- condițiile exterioare (temperatura mediului ambiant şi presiunea atmosferică).

Calculul DS se efectuează în felul următor:

1. Se determină densitatea substanței conform tabelelor, dacă este necesar, valoarea tabelară se recalculează conform condițiilor de lucru după formula:

$$\rho=\rho'\,[1-\beta(t-t')]\ (\mathrm{kg/m^3}), \qquad (3.2)$$

unde $\rho$ şi $\rho'$ sunt densitatea la temperatura $t$ şi temperatura $t'$; β- coeficientul dilatării volumetrice a lichidelor (1/˚C).

2. Se calculează diametrul interior al conductei $D_t$ la temperatura de lucru după formula:

$$D_t = D_{20}\,[1+\alpha_t\,(t-20^{\circ}C)] = D_{20}\,K_t, \qquad (3.3)$$

unde: $D_{20}$ - diametrul țevii la temperatura de 20˚C, $\alpha_t$ - coeficientul dilatării liniare a materialului din care este confecționată conducta, $K_t$ - factorul de corecție la dilatare. $D_{20}$ se determină după media aritmetică a diametrelor măsurate în două secțiuni, nemijlocit înaintea DS şi la distanța *2D* după el. În fiecare secțiune se fac patru măsurări în diferite direcții.

3. Folosindu-ne de cataloagele aparatelor alegem manometrul diferenţial reieşind din următoarele considerente:

a) manometrul diferențial se utilizează numai pentru acele substanțe care nu sunt agresive față de detaliile aparatului, în caz contrar se utilizează vase de separare sau se folosește un lichid protector;
b) presiunea maximă a manometrului trebuie să fie mai mare decît presiunea maximă de lucru în conductă înainte de DS;
c) în cazul când pierderea de presiune pe DS este considerabilă, valoarea maximală aleasă a diferenței de presiune nu trebuie să întreacă mai mult de două ori pierderea tolerată de presiune;
d) în cazul când pierderea de presiune nu este considerabilă, se alege o diferență de presiune cât mai mare, deoarece pentru debitul dat, cu cât este mai mare diferența de presiune, cu atât mai mic este nr. *m*, $m=f/F$, unde *f*-aria secțiunii transversale a orificiului DS, *F*- aria secțiunii transversale a conductei.

$$m=f/F=(\pi d^2/4)/(\pi D^2/4)=d^2/D^2 \quad (3.4)$$

La micșorarea lui *m* crește exactitatea măsurărilor şi diapazonul lor, fără creșterea erorilor datorită vâscozității.

4. Se calculează mărimea ajutătoare m$\alpha$ pentru câteva valori maxime ale diferenței de presiune, adică pentru înălțimea maximă $h_{20max}$ indicată de manometru, după următoarele formule:

$$m\alpha=Q_{sc\ max}\sqrt{\rho_n}\ /0.01252D^2\ \sqrt{\Delta P_{max}} \quad (3.5)$$

$$m\alpha=G_{sc\ max}/0.01252D^2\ \sqrt{\gamma\Delta P_{max}}\ .$$

unde $\Delta P_{max}=0.001\ h_{20\ max}$, $\rho'_{20}$- diferența maximă de presiune; $Q_{sc\ max}$ – debitul de volum maxim măsurat cu manometru, în $m^3/s$ (sc- scară); $G_{sc\ max}$- debitul de masă, în kg/s; $\rho'_{20}$- densitatea lichidului din manometru; $\alpha$- coeficientul de debit.

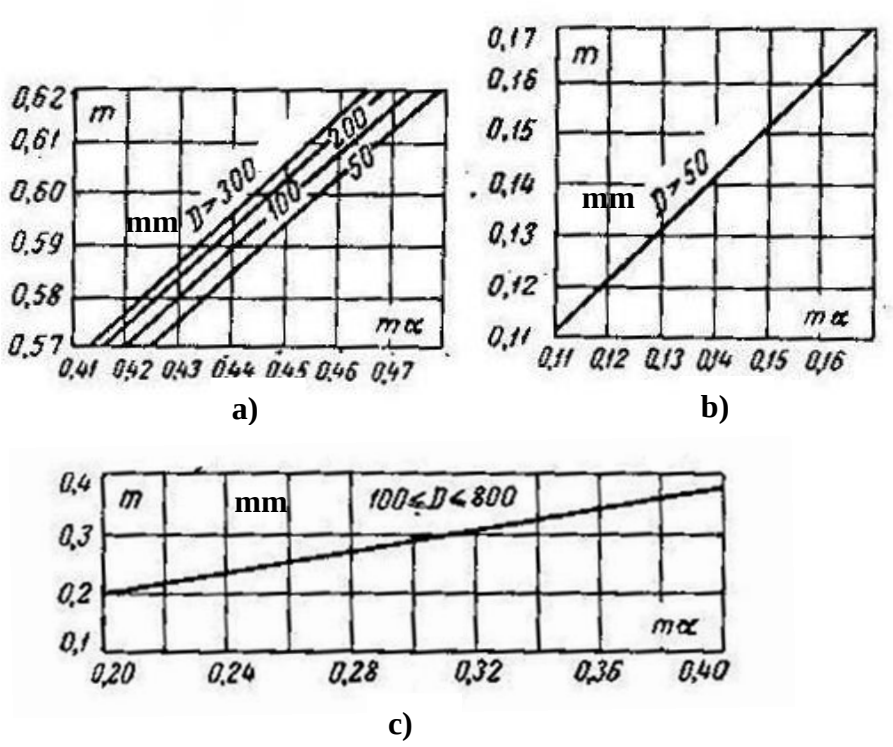



**Fig. 3.5. Dependența numărului *m* de *mα* şi *D*. a - diafragme; b – duze şi duze Venturi; c – țevi Venturi**

5. Pentru valorile obținute ale $D$ şi $m\alpha$ se determină din Fig.3.5 valoarea lui $m$, alegând în prealabil tipul instalației de strangulare.

Alegerea tipului DS se efectuează reieșind din următoarele considerente:

a. pentru măsurarea debitului substanțelor pure, cu parametrii moderați, în cazul când nu are loc deformarea DS şi depunerea impurităților, se folosesc diafragme.
b. Pentru măsurarea debitului substanțelor cu impurități sau care deteriorează suprafața DS şi de asemenea pentru substanțele care curg cu viteze mari şi acționează cu o presiune mare asupra DS se folosesc duze şi duze Venturi.
c. în toate cazurile posibile trebuie de utilizat DS normale (cu orificiul central şi parametri normați), în acest caz pierderea de presiune nu trebuie să întreacă mărimea admisă (cea mai mică pierdere de presiune este în duze şi duze Venturi).
d. în cazul când numărul Reynolds este mai mic decât numărul Re limită al DS normale $Re_{lim}$, apare necesitatea utilizării DS speciale care au valoarea mai mică a lui $Re_{lim}$. Numărul Re limită este numărul Re minimal, începând cu care coeficientul de debit α nu depinde de Re.

6. Se calculează diametrul orificiului DS după formula:

$$d_{20} = D/k'_t \cdot \sqrt{m}\,, \qquad (3.6)$$

unde $k'_t$ - factorul de dilatare a materialului DS la temperatura de lucru $t$.

7. Se determină coeficientul de debit inițial $\alpha_i$ după graficele din Fig.3.6.

$\alpha_i$ - coeficientul de debit inițial calculat pentru suprafața interioară netedă a conductei şi pentru marginea ascuțită a diafragmei. Acest coeficient este constant în regiunea $Re_{lim} \le Re \le Re_{lim\ max}$. $Re_{lim\ max}$ - valoarea maximă a lui Re mai jos de care α nu depinde de Re.

Coeficientul de debit α se calculează după formula:

$$\alpha = \alpha_i \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3, \qquad (3.7)$$

unde $k_1$-factorul de corecție care ia în considerație vâscozitatea fluidului; $k_2$-factorul de corecție la asperitatea suprafeței interne a conductei; $k_3$- factorul de corecție la faptul că marginea DS este neascuțită.

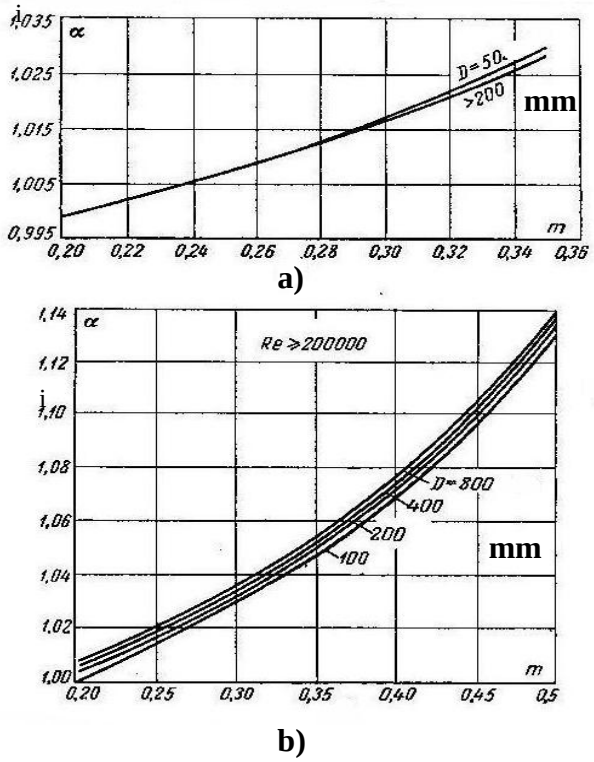



**Fig. 3.6. Dependența coeficientului de debit inițial $\alpha_i$ de numărul *m* şi *D* pentru a) – diafragme şi duze , b) - duze Venturi**

Valorile $k_1$ pentru diferite tipuri ale DS se determină după graficele din Fig.3.7.

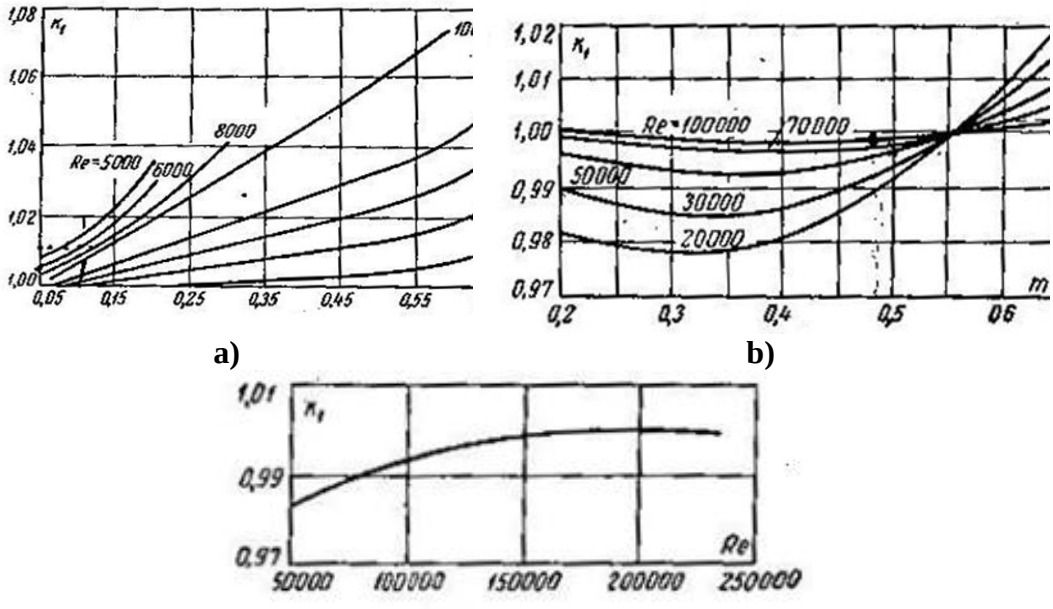



**Fig. 3.7. Factorul de corecţie a vâscozităţii $k_1$ pentru**
**a) - diafragme, b) - duze şi c) - duze Venturi**

Factorul de corecție la asperitatea suprafeței interne a conductei $k_2$ se determină după graficele din Fig.3.8.

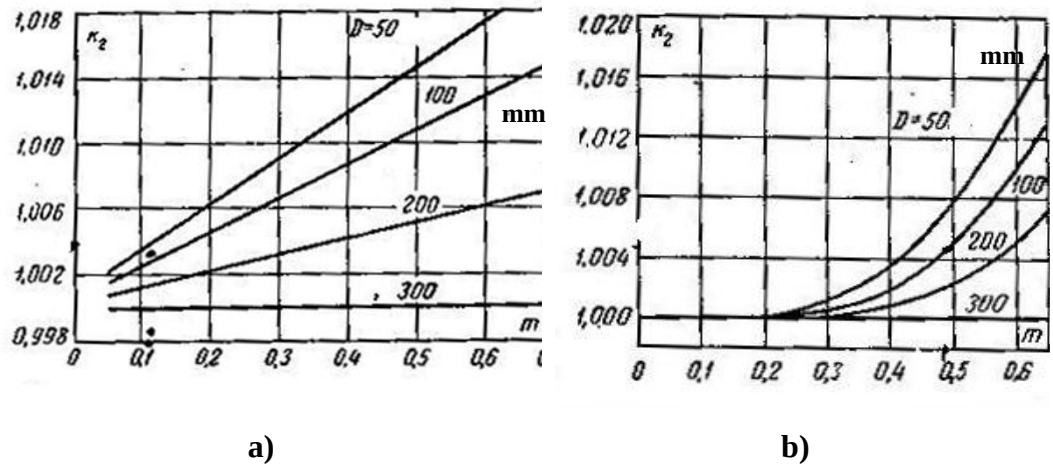



**Fig.3.8 Factorul de corecţie $k_2$ la asperitatea suprafeţei interne a conductei**
**a)- diafragme; b)-duze şi duze Venturi**

Pentru $D \geq 300$ *mm* coeficientul $k_2=1$, iar pentru țevi Venturi se ia în considerație valorile coeficientului α. Dacă diafragmele cu diametrul $d$ < 150 mm, nu reflectă lumina de la marginea ei, iar pentru $d$ > 150 mm, marginea nu are rotunjiri vizibile, atunci $k_3=1$. În celelalte cazuri, $k_3$ se ia din Fig.3.9.

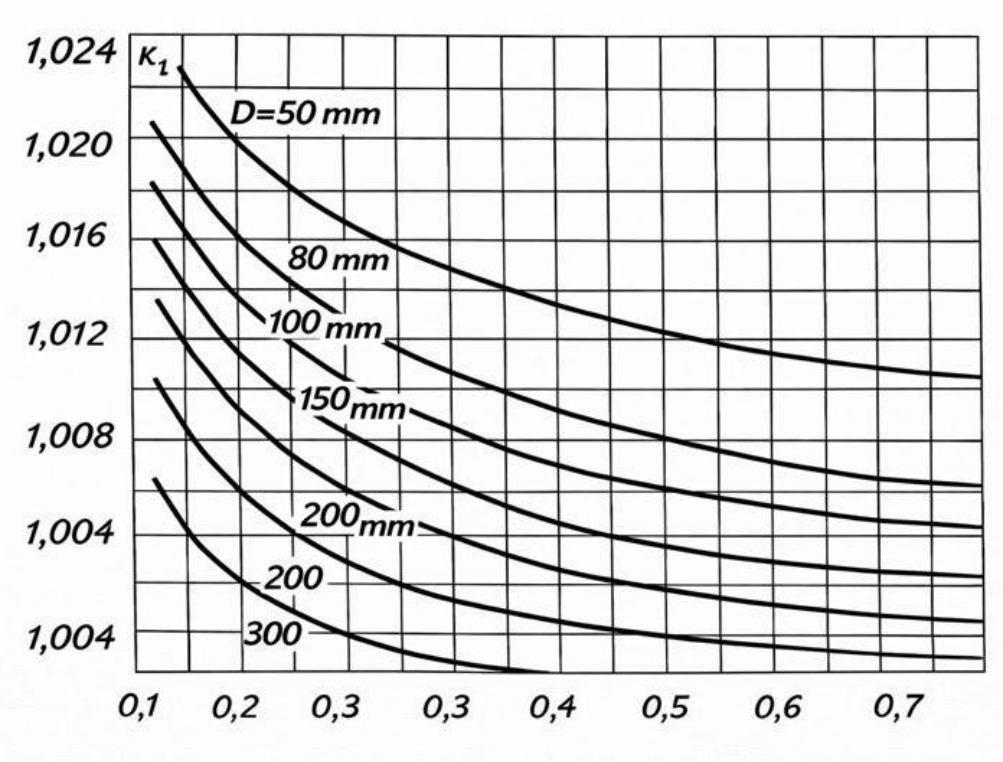



**Fig.3.9 Factorul de corecție la forma marginii de intrare a diafragmelor**

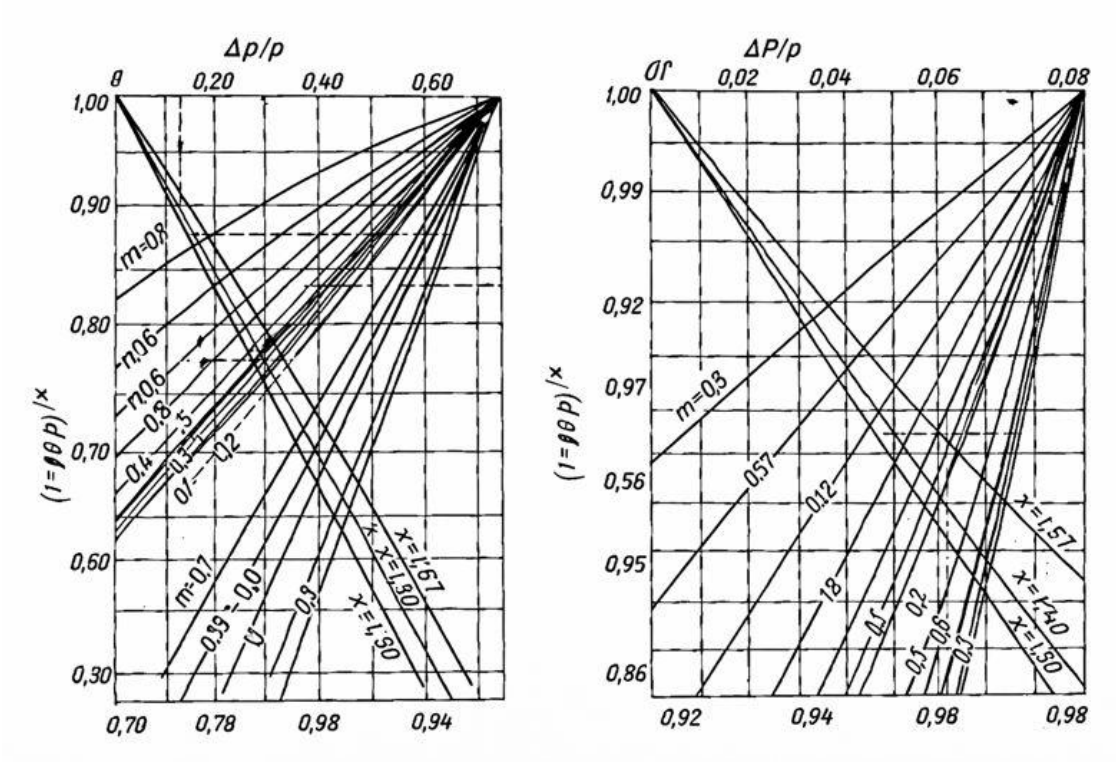
8. Conform formulelor (3.1) se verifică corectitudinea calculelor efectuate. ε – factorul de comprimare/dilatare a substanței măsurate, pentru lichide $\varepsilon=1$, pentru gaze şi vapori $\varepsilon$ cu atât mai mult diferă de 1 cu cât mai mare este raportul $\Delta p/p$. Pentru diferite gaze la aceleași valori ale lui $\Delta p/p$, ε depinde de tipul DS, de numărul $m$ şi coeficientul adiabatei κ, ε(α, $p_1$, $p_2$, $\Delta p$, κ).

În Fig.3.10, 3.11 sunt reprezentate nomogramele pentru determinarea lui ε.

Pentru substanța dată $m$ şi $\kappa$ sunt constante, iar ε variază la schimbarea lui $\Delta p$, de aceea la calcularea DS trebuie să utilizăm mărimea lui ε care corespunde debitului mediu şi formula:

$$(\Delta P/P)_{med} = n^2 (\Delta P/P)_{\max}, \qquad (3.8)$$

unde: $n$- raportul dintre $Q_{med}$ şi indicațiile maxime ale manometrului diferenţial. Dacă $Q_{med}$ nu este cunoscut, atunci $n=2/3$.




**a)** **b)**

**Fig.3.10 Nomogramele pentru determinarea coeficientului ε. a) – pentru valori mari ale lui $\Delta p/p$; b) - pentru valori mici ale lui $\Delta p/p$**

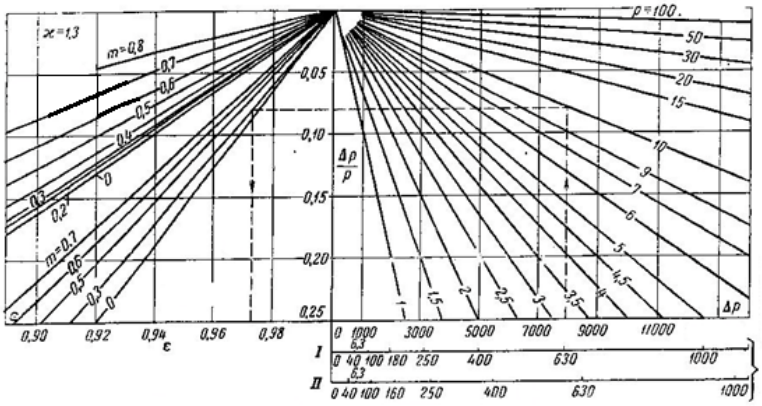


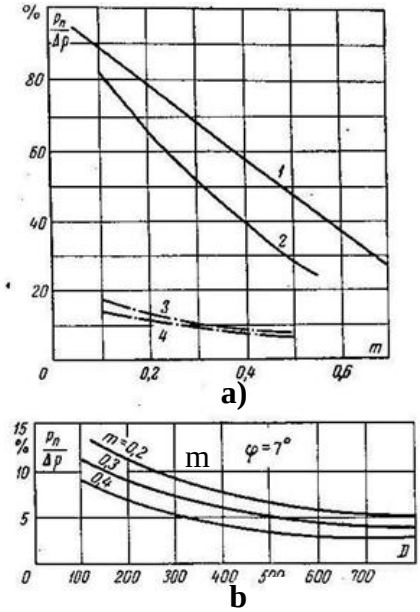

**Fig. 3.11 Nomograma determinării coeficientului ε pentru vaporii de apă saturaţi. I- pentru manometre-plută; II- pentru manometre inelare, cu burduf, şi membrană**

9. Determinăm $Q_{min}$ , pentru care putem măsura debitul fără a introduce corecțiile coeficientului de debit α în funcție de numerele Reynolds, din relațiile în care înlocuim $Re_{lim}$ pentru tipul de DS ales :

$$Re = 0.353\ Q/D\nu = 0.036\ Q\rho/D\mu;$$

$$Re = 0.353 G/D\rho\nu = 0.036\ G/D\mu; \qquad (3.9)$$

10. Pierderea de presiune pe DS se determină din Fig.3.12



**a)**

**b**

**Fig.3.12 Pierderea de presiune. a) – în DS: 1- diafragma; 2- duza; 3- duza Venturi scurtă (l = D; φ- oricare); 4- duza Venturi lungă (φ = 7°); b)- duze Venturi.**

Menționăm că pierderea de presiune pe DS este egală cu $\Delta p$ în două secțiuni, prima secțiune la distanța D înainte de DS, a doua - la distanța l după DS, unde l=6D (pentru DS normale); l=D (pentru duza Venturi lungă);l =7D, m=0.1; l =6D, m=0.25; l =4D, m=0.5 ( pentru duza Venturi scurtă).

11. Alegerea lungimilor sectoarelor rectilinii se efectuează în baza unor indicații reglementate [1].

Metoda descrisă mai sus se utilizează pentru lichide. În cazul substanțelor gazoase ea de asemenea poate fi utilizată cu următoarele specificări:

1) se determină mărimea ajutătoare mα pentru ε=1;
2) conform Fig.3.13, pentru mărimea obținută mα, determinăm valoarea aproximativă a lui m- $m_1$:

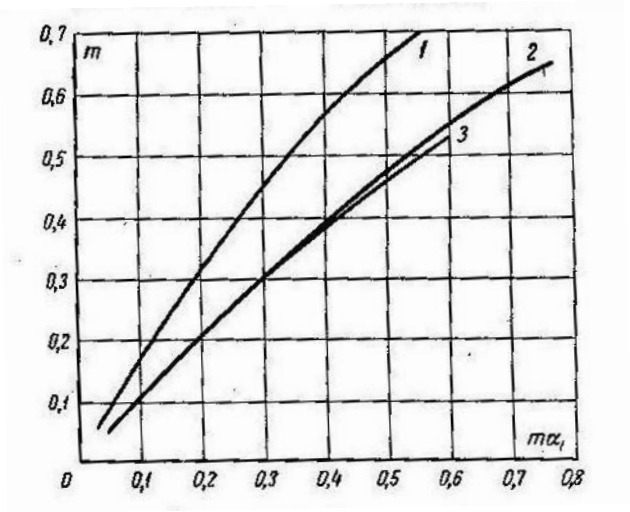



**Fig.3.13. Dependenţa *m* de *mα* pentru: 1- diafragme; 2 – duze şi duze Venturi; 3- ţevi Venturi**

3) conform Fig.3.10,3.11 se determină ε, care corespunde numărului $m_1$;
4) se calculează mărimea $(m\alpha)_0 = m\alpha/\varepsilon$;
5) pentru gaz, densitatea se determină după formula:

$$\rho=\rho_n (pT_n/p_n Tk), \qquad (3.10)$$

unde $\rho_n$ - densitatea gazului în condiții normale ($p_n$=760 mm col. Hg., $T_n$=293 K), k- coeficientul de comprimare a gazului.

Densitatea amestecului de gaze uscate la presiunea *p* şi temperatura *T* se determină conform relațiilor:

$$\rho = (\rho_{1a1} + \rho_{2a2} + \ldots + \rho_{nan})/100, \text{ (kg/m}^3\text{)};$$

$$\rho = 100/(b_1/\rho_1 + b_2/\rho_2 + \ldots + b_n/\rho_n),$$

unde: $\rho_1 \ldots \rho_n$ - densitatea componentelor gazului, iar $a_1 \ldots a_n$ - concentrația componentelor în %, $b_1 \ldots b_n$ - greutatea componentelor în %.

Densitatea gazului umed la presiunea *p* şi temperatura *T* se calculează după formula:

$$\rho = \rho_n (p-\varphi p_{v.s} T_n/p_n Tk)+\varphi \rho_{v.s.},$$

unde φ- umiditatea relativă, $p_{v.s.}$ - presiunea vaporilor saturați, $\rho_{v.s.}$ - densitatea vaporilor saturați, $\rho_n$ - densitatea gazului uscat în condiții normale.

## Exemplu de calcul al Dispozitivului de Strangulare pentru aer

* Substanța măsurată este aerul. Presiunea de lucru a aerului este p=250 bar, temperatura de lucru T=150˚C, $Q_{max}$=4500 m$^3$/h, $Q_{nom}$=4000 m$^3$/h, $Q_{min}$=2500 m$^3$/h, diametrul ţevii $D_{20}$=75 mm, Δp=1bar.

* Din tabel [1] găsim densitatea normală a substanței $\rho_n$=1.293 kg/m$^3$ (t=20˚C, p=760 mm col. Hg).

* Conform Anexei 6 determinăm coeficientul de comprimare k la t=20˚C, p= 250 bar, k=1.10 .

* Se calculează densitatea substanței la presiunea şi temperatura de lucru:

$$\rho = \rho_n pT_n/p_n Tk = 1.293(250\cdot273/1.033\cdot293\cdot1.10)=256 \text{ kg/m}^3$$

* Conform Fig. 3.14 determinăm coeficientul de dilatare termică a oțelului (țevii)- $k_t$ =1.016.

* Determinăm diametrul interior al ţevii:

$$D_t = k_t D_{20} = 75\text{mm} \cdot 1.016 = 76 \text{ mm}$$

* Conform Anexei 3 determinăm vscozitatea dinamică a gazului $\mu = 2.4 \cdot 10^{-6}$ Pa·s.

*Alegem manometrul diferențial corespunzător conform Anexei 6 din [1]- ДП-610 cu lichid interior Hg, densitatea Hg- $\rho_{l\,20}$ =13546 kg/m$^3$, cu $Q_{sc\,max}$ = 5000 m$^3$/h şi limita superioară a diferenței de presiune măsurată cu manometrul - $h_{max}$ =1000 mm col. Hg, atunci,

$$\Delta p_{max} = 0{,}001\, h_{max}\, \rho_{l\,20} (1 - \rho / \rho_{l\,20}) = 0.001 \cdot 1000 \cdot 13546 (1 - 256/13546) = 13290$$

bar.

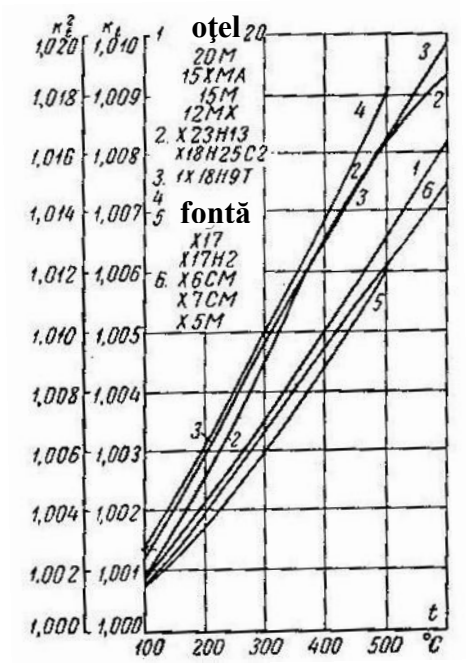



**Fig.3.14 Factorul de corecție la dilatarea termică a DS şi țevii**

* Calculăm numărul Re care corespunde $Q_{min}$ după formula (3.9):

$$Re_{min} = 0.036 \cdot Q_{min} \cdot \rho_n / D_t \cdot \mu = 0.036(2500 \cdot 1.293/76 \cdot 2.4 \cdot 10^{-6}) = 5.75 \cdot 10^5$$

Cu ajutorul Fig.3.15 alegem tipul dispozitivului de strangulare, în cazul dat **duza normală**.

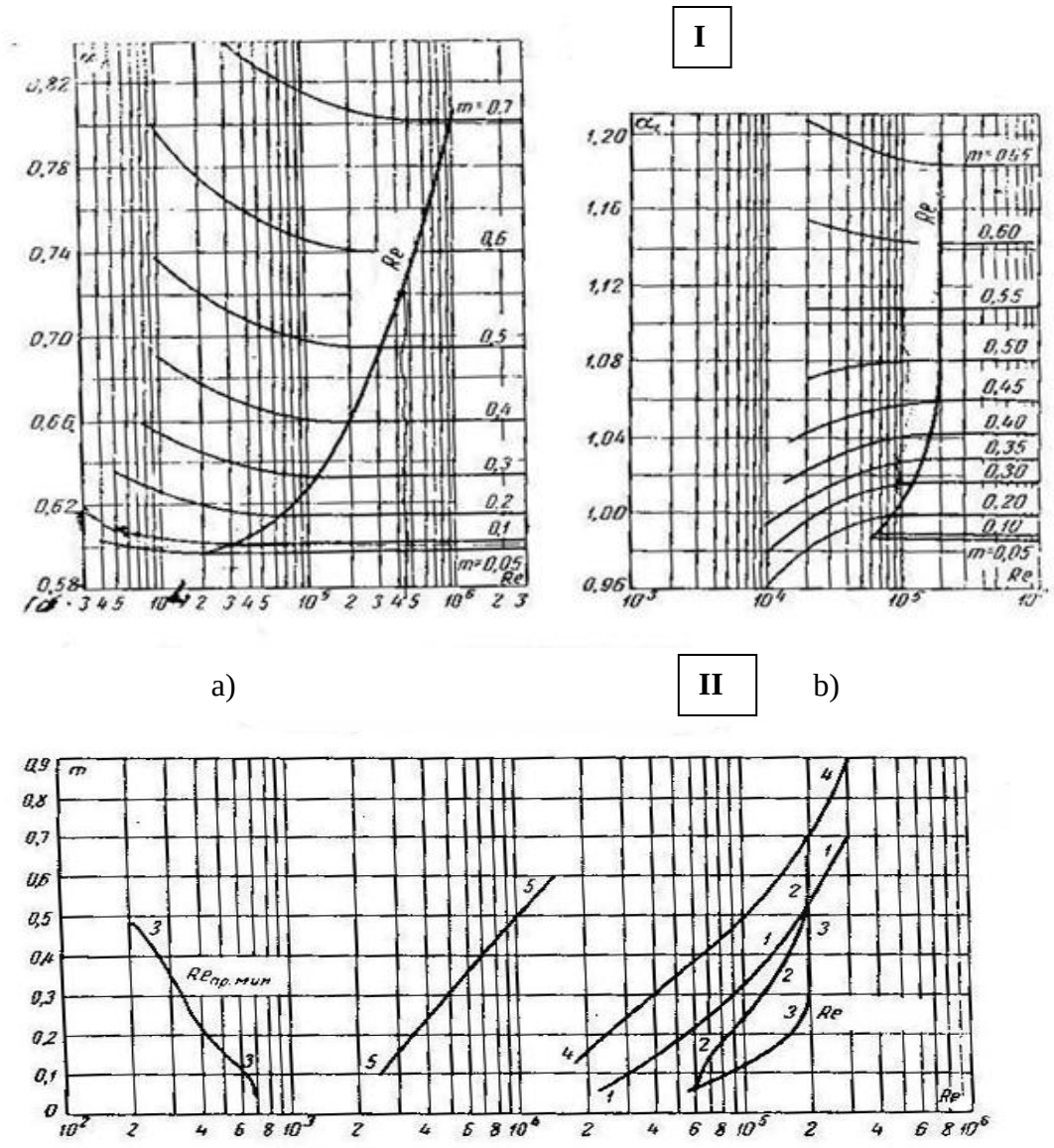



**Fig.3.15: I- Dependenţa coeficientului iniţial de debit de numărul Re. a) – diafragme; b) duze şi duze Venturi. II- Numerele limită Re. 1- diafragma normală; 2- duza şi duza Venturi normală; 3- diafragma de un sfert; 4- diafragma segment; 5- diafragma dublă**

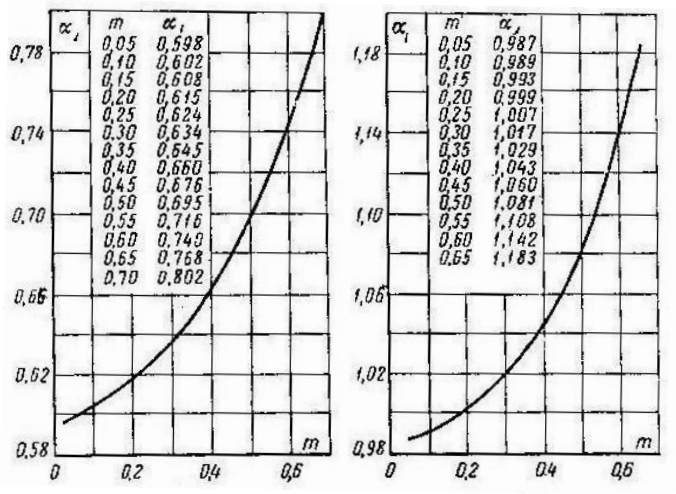
*Calculăm mărimea ajutătoare *mα*:

$$m\alpha=Q_{sc\max}\cdot\sqrt{\rho_n}\ /0.01252D^2\cdot\sqrt{\Delta P_{\max}}=5000m^3/h\cdot\sqrt{1.293}\ /0.01252\cdot76^2\cdot\sqrt{13290}=$$

$$=0.647$$

*Conform Fig.3.13 determinăm valoarea lui m=0.571, m<1.

*Din Fig.3.6 şi Fig.3.16 determinăm, după mărimea cunoscută a lui m, coeficientul $\alpha_i$ - $\alpha_i$ =1,121.




a) b)

**Fig. 3.16 Dependenţa coeficientului de debit iniţial $\alpha_i$ de suprafaţa relativă m. a) – diafragme; b)- duze şi duze Venturi**

*Cu ajutorul Fig. 3.7 şi Fig. 3.8 determinăm coeficienții $k_1$=0.988, $k_2$ =1.011, $k_3$ =1- pentru duze şi duze Venturi.

*În conformitate cu formula $\alpha=\alpha_i k_1 k_2 k_3$ =1.121·0.988·1.011·1=1.137

*După formula $Q=0.01252\ \alpha\ \varepsilon\ m\ D_{20}^{\ 2}\sqrt{\Delta P/\gamma_n}$ determinăm debitul:

$$Q=0.01252\cdot1.137\cdot1\cdot0.571\cdot76^2\cdot\sqrt{13290}/1,293=5012\ m^3/h$$

*Din Fig.3.12 determinăm pierderea de presiune la instalarea duzei: $P_p/\Delta P$ =22%.

Pp/Δp = 22 %, respectiv Pp =220 mm. col. Hg, Δp=1000mm. col. Hg.

*Deoarece, avem gaz biatomar, æ=1.4, şi din Fig.3.10 determinăm coeficientul ε=0.84, cu ajutorul căruia recalculăm valoarea debitului.

În concluzie, observăm, ca valoarea debitului calculat conform DS recomandat (Q=5012$m^3$/h) permite măsurarea corectă a debitului în condițiile specificate ($Q_{max}$ =4500 $m^3$/h), prin urmare calcularea DS a fost efectuată corect.

**Întrebări pentru evaluarea cunoștințelor**

1.Explicaţi principiul de funcționare al debitmetrelor cu DS.

2.Enumeraţi si descrieți tipurile DS.

3. Ce presupune calculul unui DS?

4. Ce parametri trebuie să cunoaștem pentru efectuarea calculului DS?

5. Descrieți modul de calculare al DS.

6.Explicaţi sensul fizic al coeficienților α- de debit, *k*- de comprimare, $k_t$-de dilatare termică a ţevii, μ - viscozitate dinamică a fluidului, $k_1$,$k_2$ ,$k_3$ şi ε.

7. Ce exprima numărul Re şi cum se alege tipul de DS?

8. Din ce considerente se alege tipul manometrului diferențial?

9. Explicați sensul fizic al numărului *m.*

**Lista bibliografică:**


1. Монахов В.И. *Измерение расхода и количества жидкости, газа и пара*. Ленинград: Метрология, 1972, 314стр.
2. NML 03-20:2024, Complexe de măsurare a cantităţilor de fluide, inclusiv cu dispozitive de strangulare. Procedura de verificare metrologică.

# Lucrarea de laborator nr. 4

## Studierea parametrilor gazului în procese termodinamice

| Abilități | Responsabilitate și autonomie |
|---|---|
| - să diferențieze metodele de măsurare a presiunii și tipurile de presiune;<br>- să utilizeze diferite metode de măsurare a presiunii;<br>- să numească parametrii ce caracterizează gazul ideal;<br>- să descrie procesele în gaze ideale: procesul izocoric, izobar, izotermic şi adiabatic;<br>- să cunoască ecuaţia lui Clapeyron – Mendeleev şi primul principiu al termodinamicii;<br>- să deducă Ecuaţia Mayer;<br>- să determine experimental variaţia presiunii gazului în procesul izobar, izotermic şi adiabatic;<br>- să determine raportul capacităţilor termice molare (specifice) ale aerului pentru presiune şi volum constant, coeficientul adiabatei. | Absolventul autonom efectuează studiul realizărilor ştiinţei şi tehnicii, stabileşte şi testează ipotezele de lucru şi prelucrează datele experimentale fiind responsabil pentru corectitudinea prelucrării datelor și rezultatele obținute. |

**Obiectivele lucrării:**

1. determinarea variației presiunii gazului în procesul izobar, izotermic şi adiabatic;
2. determinarea raportului capacităților termice molare (specifice) ale aerului pentru presiune şi volum constant.

**Aparate şi accesorii**: un vas de sticlă, o pompă, cronometru, barometru, manometru.

**Note teoretice [1,2]**

Starea unei cantități de gaz se caracterizează prin trei parametri: presiunea *P*, volumul *V* și temperatura *T*. Ecuația care leagă acești trei parametri se numește ecuația de stare a gazului. Pentru un mol de gaz ideal ea are forma:

$$PV = RT\ . \qquad (4.1)$$

Aceasta este ecuația lui Clapeyron – Mendeleev, unde R este constanta universală a gazelor.

Un alt parametru important al gazelor este raportul capacităților termice molare (specifice) ale gazului pentru presiune şi volum constant $C_p/C_v$, el are un rol semnificativ în procesele adiabatice. Spre exemplu, acest raport determină viteza de propagare a sunetului în gaze, de el depinde curgerea prin țevi a gazelor cu viteza sunetului şi obținerea vitezelor supersonice în țevi dilatante.

Valoarea capacității termice a gazului depinde de condițiile încălzirii lui.

Să determinăm această dependență utilizând ecuația de stare a gazului şi primul principiu al termodinamicii, conform căruia cantitatea de căldură $\delta Q$, transmisă unui sistem, se consumă pentru creșterea energiei interne $dU$ şi pentru lucrul $\delta A$, pe care sistemul îl efectuează împotriva forțelor externe:

$$\delta Q = dU + \delta A\ . \qquad (4.2)$$

Conform definiției, capacitatea termică este egală cu cantitatea de căldură care trebuie comunicată corpului pentru ca temperatura lui să varieze cu un grad $C = \delta Q / dT.$ Deoarece lucrul elementar $\delta A = PdV$ , atunci

$$C = \delta Q / dT = dU / dT + \delta A / dT = dU / dT + PdV / dT. \qquad (4.3)$$

Capacitatea termică va avea diferite valori pentru aceeași variație a temperaturii $dT$, în dependență de modurile de încălzire, adică de proces.

Să studiem variația parametrilor gazului în diferite procese termodinamice.

1. Procesul izocor (volumul V = const).

Din ecuația (4.1) rezultă că $P = const \cdot T$ , adică, pentru un volum constant de gaz, presiunea lui este direct proporțională cu temperatura gazului (legea lui Charles). Prin urmare, odată cu creșterea temperaturii gazului va crește şi presiunea lui, acest fapt trebuie luat în considerație, spre exemplu, la

confecționarea țevilor, vaselor, pentru ca ele să reziste la variația de presiune şi temperatură.

Deoarece volumul gazului rămâne constant în procesul variației temperaturii, $dV = 0$ şi conform ecuației (3), capacitatea termică la volum constant $C_V$ :

$$C_V = dU / dT \ . \tag{4.4}$$

2. Procesul izobar (presiunea P = const).

Din ecuația (4.1) rezultă că $V = const \cdot T$ , adică, la presiune constantă, volumul gazului este direct proporțional cu temperatura lui (legea lui Gay-Lussac). Ca consecință, vara, odată cu creșterea temperaturii mediului ambiant, volumul gazului crește, masa lui rămâne aceeași şi conform indicațiilor contorului de gaz (care arată volumul total) vom plăti mai mult pentru aceeași masă de gaz decât iarna, când situația este inversă. Din această cauză, contoarele de gaz sunt dotate cu corectoare, care iau în considerație variație volumului gazului în funcție de temperatură.

Conform ecuația (4.3), pentru procesul izobar, capacitatea termică la presiune constantă $C_P$ :

$$C_P = dU / dT + PdV / dT \ . \tag{4.5}$$

Să determinăm relația dintre capacitatea termică la presiune constantă $C_P$ şi la volum constant $C_V$. Diferențiem ecuația (4.1): $PdV + VdP = RdT$ şi, deoarece, $dP = 0$, atunci $PdV = RdT$. Substituind ultima relaţie în (4.5) şi luând în considerație (4.4), obţinem

$$C_P = C_V + R. \tag{4.6}$$

Această relație poartă numele de ecuația Mayer, ea demonstrează că capacitatea termică la presiune constantă $C_P$ este mai mare decât cea la volum constant $C_V$ cu constanta $R$. Fapt care se explică prin aceia că la presiune constantă, odată cu creșterea temperaturii, crește energia internă a gazului şi,

totodată, gazul efectuează un lucru la dilatare (vezi ec. (4.1)), pe când la volum constant, odată cu creşterea temperaturii, creşte numai energia internă a gazului (lucrul este egal cu zero). Din aceste considerente, constanta *R* are sensul fizic de lucrul efectuat de un mol de gaz la presiune constantă.

3. Procesul izotermic (temperatura T = const).

Presiunea gazului la temperatură constantă este proporţională numărului de molecule ale gazului ce se află în volumul dat, adică masei gazului. Starea gazelor se descrie cu ajutorul legii lui Boyle – Marriotte, care rezultă din relaţia (4.1):

La temperatură constantă volumul gazului ce se află într-un vas izolat este invers proporţional cu presiunea $V = const / P$,

sau

la temperatură constantă produsul dintre presiunea gazului dintr-un vas izolat şi volumul lui este o mărime constantă $PV = const$,

sau

la temperatură constantă presiunea şi densitatea gazului ce se află într-un vas izolat sunt direct proporţionale: $P \sim \rho$.

În acest caz $dT = 0$ şi din (4.2) rezultă că $\delta Q = \delta A$, adică toată căldura transmisă corpului se consumă pentru efectuarea lucrului.

4. Procesul adiabatic. Procesul care decurge fără schimb de căldură cu mediul exterior ( $\delta Q = 0$ ) se numeşte adiabatic (de obicei, acestea sunt procese care decurg rapid). Conform ecuaţiei (4.2) şi (4.4), $\delta A = -dU = -C_V dT$. Prin urmare, dilatarea sau comprimarea se efectuează numai din contul variaţiei energiei interne, adică la dilatarea adiabatică gazul se va răci, iar la comprimare – se va încălzi.

Conform teoriei cinetico-moleculare a capacității termice se poate de demonstrat că

$$C_V = (i/2)R, \tag{4.7}$$

atunci, conform relaţiei (4.6)

$$C_P = [(i+2)/2]R, \tag{4.8}$$

aici $i$ este numărul gradelor de libertate a unei molecule a gazului (pentru atom $i$ = 3, pentru molecula biatomară $i$ = 5, iar pentru cea cu trei sau mai mulţi atomi $i$ = 6). Împărțind fiecare factor a ecuației (4.8) la (4.7), obținem expresia pentru raportul capacităților termice molare a gazului ideal, numit coeficientul adiabatei

$$\gamma = C_p / C_V = (i+2)/i \ . \tag{4.9}$$

Astfel, acest coeficient depinde teoretic numai de valoarea gradelor de libertate a moleculei gazului.

Relaţia dintre presiunea şi volumul gazului în procesul adiabatic este descrisă de legea lui Poisson $P\,V^{\gamma} = const$.

## Descrierea metodei

Lucrarea dată constă în determinarea variației presiunii aerului în procesul izobaric, izotermic şi adiabatic şi determinarea raportului capacităților termice molare (specifice) ale aerului pentru presiune şi volum constant $C_p/C_v$ printr-o metoda bazată pe dilatarea adiabatică a gazului. Orice schimbare bruscă a volumului poate fi considerată, cu o aproximație suficientă, un proces adiabatic, deoarece cu cât mai repede are loc acest proces cu atât este mai mic schimbul de căldură cu mediul exterior.

Instalația experimentală constă dintr-un vas din sticlă $C$ unit cu un manometru deschis $M$ cu apă şi o pompă $P$ (Fig.4.1). Dacă pompăm aer în vas până când diferența dintre nivelele lichidului in ambele braţe ale manometrului devine egală cu 25-30 cm, atunci presiunea creşte până la valoarea $P_1^I$ şi temperatura la fel va creşte (vezi procesul izocor). După 3-4 minute, temperatura

aerului din vas va deveni egală cu temperatura camerei $T_1$ (temperatura se micșorează datorită schimbului de căldură, respectiv, şi presiunea se va micşora de la $P_1^I$ până la $P_1$), volumul gazului va fi $V_1$ (starea 1 din Fig.4.2). Apoi, deschizând pe un timp scurt robinetul A, unim vasul cu atmosfera (îl deschidem) şi presiunea devine egală cu cea atmosferică. Această dilatare bruscă a aerului este un proces adiabatic (procesul 1-2 din Fig.4.2). Volumul va fi egal cu $V_2$, presiunea – cu $P_2$, cea atmosferică, iar temperatura – cu $T_2$ (starea 2 din Fig.4.2). În acest caz $T_2 < T_1$, deoarece lucrul de dilatare a gazului se efectuează pe contul energiei lui interne şi, de aceia, la dilatarea adiabatică gazul se răcește.

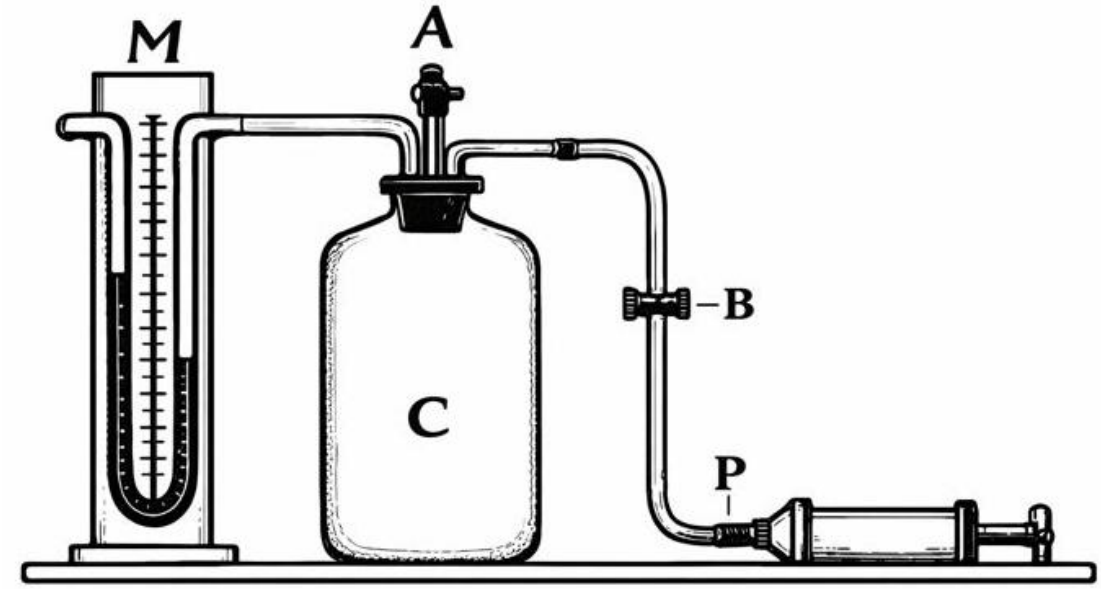



**Fig. 4.1. Instalația experimentală**

Pentru tranziția adiabatică din prima stare în a doua, este valabilă ecuația lui Poisson:

$$P_1 V_1^{\gamma} = P_2 V_2^{\gamma} \ , \qquad (4.10)$$

unde γ este coeficientul adiabatei, mărimea definită de formula (4.9). Peste 3-4 minute după închiderea robinetului, aerul din vas se încălzește izocor până la

temperatura camerei $T_1$ (datorită schimbului de căldură), iar presiunea crește până la valoarea $P_3$ (starea 3 din Fig.4.2).

Comparând starea finală a gazului (4.3) cu starea inițială (4.1), observăm că ele au una şi aceeași temperatură $T_1$, cea a camerei, deci sunt pe una şi aceeași izotermă, prin urmare putem scrie legea lui Boyle –Mariotte:

$$P_1V_1 = P_3V_2 \,. \tag{4.11}$$

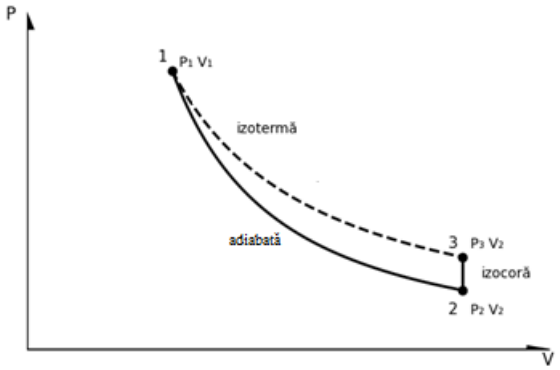



**Fig. 4.2. Diagrama p–V a unui ciclu termodinamic compus din transformări izotermă, adiabată şi izocoră**

Din expresiile (4.10) şi (4.11) determinăm γ. Pentru aceasta ridicăm ecuaţia (4.11) la puterea γ şi o împărţim la expresia (4.10), astfel

$$\frac{P_1^{\gamma}V_1^{\gamma}}{P_1V_1^{\gamma}} = \frac{P_3^{\gamma}V_2^{\gamma}}{P_2V_2^{\gamma}} \text{ , de unde } \left(\frac{P_3}{P_1}\right)^{\gamma} = \frac{P_2}{P_1}\,.$$

Logaritmăm ultima expresie şi găsim coeficientul adiabatei

$$\gamma = \ln(P_2/P_1)/\ln(P_3/P_1) = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{\ln P_3 - \ln P_1}. \tag{4.12}$$

Această expresie poate fi simplificată. Notăm diferența de nivele dintre brațele manometrului, ce apare după pomparea aerului, prin $H$, iar diferența similară, ce apare peste 3-4 minute după închiderea robinetului, prin $h_0$. În aceste cazuri, presiunea aerului va fi egală cu

$$P_1 = P_2 + \alpha H; \qquad P_3 = P_2 + \alpha h_0, \tag{4.13}$$

unde α este coeficientul de trecere de la unitățile de măsură a presiunii în diferența nivelelor apei la alte unități de măsură a presiunii. Pentru diferite unități α este diferit (vezi Anexa 1). Deoarece presiunea atmosferică normală $P_2$ – 760 mm a col. de mercur ($1{,}013 \cdot 10^5$ Pa) corespunde presiunii unei coloane de apă de 10 m, iar $H$ şi $h_0$ sunt mai mici decât 30 cm, atunci al doilea termen din expresiile (4.13) este cu mult mai mic ca primul ($\alpha H \langle\langle P_2 ; \alpha h_0 \langle\langle P_2$). Din (4.13) obținem $P_2 = P_1 - \alpha H;\ P_3 = P_1 - \alpha(H - h_0)$. Substituind $P_2$ şi $P_3$ în (4.12) obținem:

$$\gamma = \frac{\ln\left[\left(P_1 - \alpha H\right)/P_1\right]}{\ln\left[\left(P_1 - \alpha(H - h_0)\right)/P_1\right]} = \frac{\ln\{1 - \dfrac{\alpha H}{P_1}\}}{\ln\{1 - \dfrac{\alpha(H - h_0)}{P_1}\}}.$$

Mărimile $x = \dfrac{\alpha H}{P_1}$ şi $y = \dfrac{\alpha(H - h_0)}{P_1}$ sunt cu mult mai mici ca unitatea, de aceia sunt juste următoarele aproximaţii $\ln(1 - x) \approx -x$, $\ln(1 - y) \approx -y$, de unde

$$\gamma = \frac{\left[\left(\alpha H\right)/P_1\right]}{\left[\left(\alpha(H - h_0)\right)/P_1\right]} = \frac{H}{H - h_0}. \tag{4.14}$$

Aceasta este formula de lucru şi, conform ei, se calculează coeficientul adiabatei γ. Mărimea $h_0$ din formula (4.14) corespunde cazului când robinetul se închide exact la sfârșitul procesului adiabatic 1-2 (punctul 2 din Fig.4.2).

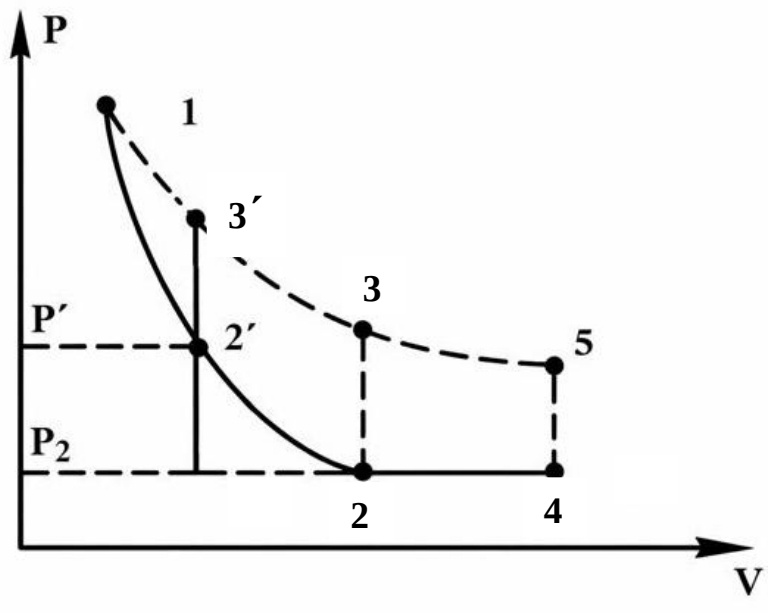



**Fig.4.3. Reprezentarea în diagrama p–V a transformărilor izotermă și adiabată cu etape izocore succesive.**

Dacă închidem robinetul înainte de sfârșitul procesului adiabatic, adică în momentul când presiunea în vas se micșorează până la valoarea P′, dar încă nu a ajuns la cea atmosferică $P_2$ (starea 2′ din Fig.4.3), atunci diferența respectivă de nivele în manometru - *h′*, după efectuarea proceselor de dilatare şi încălzire izocorică, se determină de ordonata 2′-3′ (vezi Fig.4.3), în loc de ordonata 2-3, ceia ce duce la mărirea valorii lui γ în comparație cu valoarea lui reală (vezi formula (4.14)). Dacă închidem robinetul peste un timp oarecare după finisarea procesului 1-2, atunci, în acest interval, temperatura din vas va crește din cauza schimbului de căldură cu mediul exterior (procesul izobar 2-4 din Fig.4.3). În acest caz, diferența corespunzătoare de nivele *h* se determină de ordonata 4-5 şi este mai mică, ceia ce va duce la micșorarea lui γ.

Pentru a obține un rezultat corect al măsurărilor trebuie să închidem robinetul exact în momentul când gazul se află în starea 2, ceia ce tehnic este

imposibil. Din această cauză ordonata 2-3, care corespunde diferenței nivelelor 2-3, se găsește prin altă metodă.

În acest scop, vom studia dilatarea adiabatică 1-2 la deschiderea robinetului, luând în considerație schimbul de căldură cu mediul exterior pe durata procesului 2-4 (Fig.4.4).

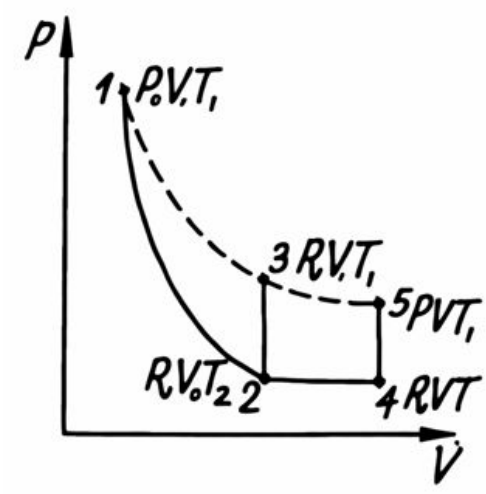



**Fig.4.4.**

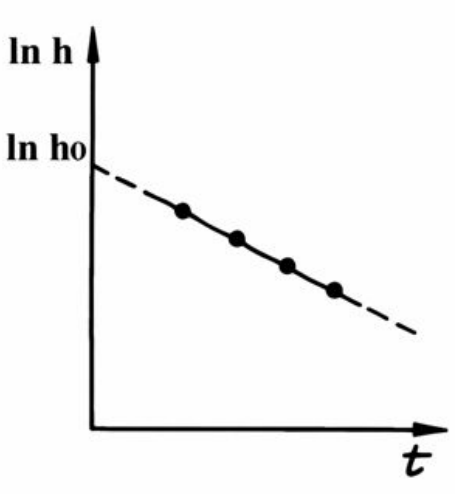



**Fig.4.5**

Presupunem că gazul se află în starea 1. Deschizând robinetul A efectuăm dilatarea adiabatică (procesul 1-2). Astfel, temperatura gazului se micșorează, față de cea a camerei $T_1$, până la $T_2$, iar presiunea devine egală cu cea atmosferică $P_2$. dacă robinetul rămâne deschis în intervalul de timp $\tau$ după finisarea procesului 1-2, atunci temperatura în vas $T$ va creşte întrucâtva datorită schimbului de căldură, ceia ce corespunde procesului izobaric 2-4. După aceasta închidem robinetul şi-l lăsam aşa un timp oarecare, până când temperatura în el va deveni egală cu temperatura camerei $T_1$. (procesul izocor 4-5). Astfel presiunea în vas va creşte cu $\Delta P$, această creştere se determină cu ajutorul manometrului după diferenţa corespunzătoare de nivele $h$.

Odată cu micşorarea timpului τ, mărimea *h* (vezi Fig.4.5) creşte şi, la limită, pentru $\tau \to 0$ tinde către $h_0$ (determinată de punctele 2 şi 3). Deci, mărimea $h_0$ poate fi calculată din graficul experimental al dependenţei dintre *h* şi τ. Valoarea lui $h_0$ se determină de ordonata punctului de intersecţie a acestui grafic cu axa ordonatelor. Pentru a construi acest grafic măsurăm un şir de valori ale înălţimii *h,* care corespund diferitor valori ale lui τ şi conform punctelor experimentale obţinute construim o linie, care poate fi prelungită până la intersecţia cu axa ordonatelor. Însă, o astfel de extrapolare este admisă numai în cazul când apriori se cunoaşte dependenţa lui *h* de τ. În condiţiile acestui experiment se respectă relaţia $\ln h = \ln h_0 + A\tau$, adică o dependenţă liniară dintre *ln h* şi τ, iar ordonata iniţială este egală cu logaritmul mărimii căutate $h_0$. *A* este coeficientul unghiular al dreptei şi depinde de condiţiile efectuării experimentului.

Obţinând experimental un şir de valori ale lui *ln h,* care corespund intervalelor diferite de dilatare a gazului în timp (pentru una şi aceiaşi presiune iniţială $P_1$), putem construi graficul dependenţei $\ln h = f(\tau)$ şi să ne convingem că acesta va fi o linie dreaptă (Fig.4.5). Prelungim graficul până la intersecţia lui cu axa ordonatelor, atunci ordonata punctului de intersecţie va fi egală numeric cu logaritmul mărimii căutate $h_0$. (Luând în consideraţie că durata procesului 1-2 este neglijabil de mică în comparaţie cu durata procesului 2-4, în calitate de τ putem lua timpul total în decursul căruia este deschis robinetul *A*.)

Coeficientul γ se calculează şi mai exact luând în consideraţie atât schimbul de căldură, cât şi ieşirea unei cantităţi a gazului din balon în timpul încălzirii. Se poate de demonstrat că în acest caz coeficientul γ satisface relaţiei

$$\frac{H}{h} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \exp\left( - \frac{k\tau}{mc_p} \right),$$

unde *k*- constanta Boltzmann, *m* – masa iniţială a gazului din vas, $C_p$ – capacitatea termică specifică a aerului la presiune constantă.

Logaritmând ultima expresie obţinem: $\ln\frac{H}{h} = \ln\frac{\gamma}{\gamma-1} - \frac{k\tau}{mc_p}$

Graficul dependenţei $\ln\frac{H}{h}$ de timpul τ este o funcţie liniară: $y = ax + b$,

unde $y = \ln\frac{H}{h}$, $x = \tau$ $a = -\frac{k}{mc_p}$ şi $b = \ln\frac{\gamma}{\gamma-1}$. Dacă extrapolăm acest grafic până la τ = 0, atunci el va tăia pe axa ordonatelor intervalul *b* (*y=b,* pentru *x= 0*). Deoarece $b = \ln\frac{\gamma}{\gamma-1}$, rezultă că

$$\gamma = \frac{e^b}{e^b - 1}. \qquad (4.15)$$

## Mersul lucrării

1. Se pompează în vas aer până când diferența de nivele a lichidului în manometru devine egală cu 25-30 cm. Pentru a avea una şi aceiaşi presiune iniţială $P_1$, de fiecare dată vom pompa până la aceeași diferenţă de înălțime (spre ex. 30 cm). Închidem robinetul *B* şi aşteptăm 1-2 minute, până când temperatura interioară se va egala cu cea a camerei (diferenţa de înălţime şi presiunea în vas nu mai variază ). După aceia se citesc indicaţiile manometrului $H_1$ şi $H_2$. Se găseşte mărimea $H = H_1 - H_2$. Datele se citesc după marginea de jos a meniscului lichidului din braţul manometrului.

2. Cu o mişcare bruscă se deschide robinetul *A*, conectând, astfel, vasul cu atmosfera şi concomitent se include cronometrul. Robinetul se ţine deschis $\tau \approx 1\,s$ şi repede se închide. În acest proces presiunea devine egală cu cea atmosferică, iar temperatura se micşorează. Aşteptăm 3-4 minute până când

temperatura din vas devine iarăşi egală cu cea a camerei (diferenţa de înălţime dintre braţele manometrului nu mai creşte) şi citim indicaţiile manometrului $h_1$ şi $h_2$ şi determinăm $h = |h_1 - h_2|$ ($\tau \approx 1\,s$).

3. Repetăm experimentul din punctele 1 şi 2 pentru una şi aceiaşi diferenţă *H*, dar ţinem robinetul deschis $\tau = 3, 5, 10, 15, 20, 25 \ldots s$. În acest caz, până la deschiderea robinetului, se ajustează cu atenţie nivelul în unul din braţele manometrului cu ajutorul robinetului *B* (după echilibrarea temperaturii) la aceiaşi diviziune ca în primul caz. Se determină *h* pentru $\tau = 3, 5, 10, 15, 20, 25 \ldots s$. Datele se înscriu în tabelul 4.1.

**Tabelul 4.1**

| τ, s | $H_1$, mm | $H_2$, mm | $H=H_1-H_2$,mm | $h_1$, mm | $h_2$, mm | $h= h_1-h_2$, mm | *ln h* | *H/h* | *lnH/h* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | | | | |
| .... | | | | | | | | | |

Experimentul se efectuează pentru câteva valori ale lui *H*.

4. Conform datelor experimentale obţinute se construieşte graficul cu axa absciselor – timpul τ, iar axa ordonatelor – valoarea *ln h* (vezi Fig.4.5). Convingându-ne că graficul are forma unei drepte, el se prelungeşte până la intersecţia lui cu axa ordonatelor ( punctele experimentale care nu se aşează pe dreaptă trebuiesc verificate prin măsurări repetate) şi se determină *ln* $h_0$. Apoi se calculează mărimea $h_0$ ($h_0 = \exp(\ln h_0)$), care se substituie în formula (4.14) şi se determină valoarea coeficientului adiabatei γ.

Funcţia liniară $\ln h = \ln h_0 - A\tau$ se apropie cu o eroare pătratică medie minimă de sistemul valorilor experimentale $\ln h_i(\tau_i)$. Dependenţa liniară căutată $\ln h(\tau)$ se determină mai exact cu ajutorul metodei pătratelor minime .

Calcularea coeficienţilor aproximaţiei liniare $\ln h_0$ şi *A* se efectuează conform formulelor

$$A = \frac{\sum_{i=1}^{N}\tau_i \cdot \sum_{i=1}^{N}\ln h_i - N\sum_{i=1}^{N}\tau_i \ln h_i}{(\sum_{i=1}^{N}\tau_i)^2 - N\sum_{i=1}^{N}\tau_i^2}, \qquad \ln h_0 = \frac{1}{N}\left(\sum_{i=1}^{N}(\ln h_i) - A\sum_{i=1}^{N}\tau_i\right),$$

unde *N* este numărul de experimente (numărul perechilor de valori ale abscisei $\tau_i$ şi ordonatei $\ln h_i$ punctului experimental), iar *i* este numărul experimentului (perechii de valori).

Luăm exponenta de la coeficientul determinat al aproximaţiei liniare $\ln h_0$ şi găsim $h_0$, astfel se calculează mai exact coeficientul adiabatei γ, conform formulei

$$\gamma = 1/[1 - (h_0 / H)], \tag{4.16}$$

5. Se calculează eroarea relativă şi absolută conform formulei de lucru

$$\varepsilon = \frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \frac{\Delta(1 - h_0 / H)}{1 - h_0 / H} = \frac{\Delta h_0}{h_0} + \frac{h_0}{H - h_0} \cdot \frac{\Delta H}{H}. \tag{4.17}$$

Eroarea $\Delta H$ este limita sensibilității manometrului, adică $\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2$. Aici $\Delta H_1, \Delta H_2$ se iau ca o diviziune întreagă a scării manometrului (luând în consideraţie variaţia indicaţiilor datorită paralaxei). Mărimea $\Delta h_0$ este egală cu $\Delta H$.

6. Rezultatul se înscrie în forma standard $\gamma = \bar{\gamma} \pm \Delta\gamma$.

7. Se compară valoarea obţinută a lui γ cu cea teoretică pentru aer (vezi formula (9), unde numărul gradelor de libertate pentru aer *i* = 5).

8. Construiţi graficul dependenţei $\ln \frac{H}{h}$ de timpul τ. Convingându-ne că graficul are forma unei drepte, el se prelungeşte până la intersecţie cu axa ordonatelor şi se determină *b*, care se substituie în formula (4.15) şi se determină

valoarea coeficientului adiabatei γ. Comparaţi valorile obţinute ale coeficientului γ cu ajutorul formulei (4.14) şi (4.15) şi faceţi concluziile necesare.

**Întrebări pentru evaluarea cunoştinţelor**

1. Numiţi parametrii principali ai gazului şi scrieţi relaţia dintre ei. Definiţi capacitatea termică molară şi specifică.
2. Descrieţi procesele termodinamice, legile corespunzătoare acestora şi explicaţi dependenţa parametrilor gazului în diferite procese.
3. Deduceţi relaţia dintre $C_p$ şi $C_V$ din primul principiu al termodinamicii. Din ce cauză $C_p > C_V$?
4. Analizaţi procesele termodinamice şi variaţia parametrilor aerului din vas (Fig.4.2.-4.4) şi deduceţi formula de lucru (4.14) pentru γ.
5. Din ce cauză trebuie să construim graficul dependenţei ln $h$ ca funcţie de τ?
6. Prin ce se deosebesc formulele de lucru (4.14) şi (4.15) şi ce procese ia în consideraţie relaţia (4.15)?
7. Care sunt cauzele abaterilor valorilor experimentale ale coeficientului γ de cea teoretică?

**Lista bibliografică:**


1. Механика и молекулярная физика: *Физический практикум. Под редакцией Ивероновой В.И.* Москва: Наука, 1967, 352стр.
2. Лабораторные занятия по физике. Под редакцией Гольдина Л.Л. Москва: Наука, 1983, 704стр.

# Lucrarea de laborator nr.5

## Verificarea experimentală a ecuației Bernoulli

| Abilități | Responsabilitate și autonomie |
|---|---|
| - să cunoască metode de măsurare a presiunii și tipurile de presiune;<br>- să utilizeze diferite metode de măsurare a presiunii<br>- să cunoască metodele de calculare ale debitului;<br>- să utilizeze debitmerele de diferit tip;<br>- să definească noţiunile: linii de curent, flux ideal, flux staţionar, debit de volum, presiune statică, presiune dinamică, presiune totală;<br>- să analizeze graficele dependenţei presiunii lichidului ca funcţie de viteză şi a dependenţei presiunii de lungimea ţevii;<br>- să deducă ecuaţia Bernoulli;<br>- să verifice experimental ecuaţia Bernoulli. | Absolventul autonom efectuează studiul realizărilor ştiinţei şi tehnicii, stabileşte şi testează ipotezele de lucru şi prelucrează datele experimentale fiind responsabil pentru corectitudinea prelucrării datelor și rezultatele obținute. |

**Obiectivele lucrării:** Studierea legităţilor mişcării fluidelor şi verificarea experimentală a ecuaţiei Bernoulli.

**Aparate şi accesorii:** instalaţia experimentală, vase calibrate, cronometru, termometru.

### Note teoretice [1,2]

Vom studia legităţile lichidelor şi gazelor în mişcare. Legităţile mişcării lichidelor sunt valabile şi pentru gaze, cu condiţia că viteza fluxului este mai mică decât viteza sunetului, deoarece în acest caz gazele pot fi considerate incompresibile.

Viteza de scurgere a lichidului ideal depinde numai de înălţimea coloanei de lichid din vas. Dacă v - viteza de scurgere a lichidului, *h*- înălţimea coloanei de lichid, $g = 9{,}81$ m/s$^2$ – acceleraţia căderii libere, atunci

$$v = \sqrt{2gh}\,. \qquad (5.1)$$

Dacă $V$ – volumul lichidului care curge prin secţiunea $A$, $t$ – timpul în decursul căruia curge acest volum, $A$ – aria secţiunii ţevii, v – viteza de curgere a lichidului, atunci volumul lichidului scurs se determină din relaţia

$$V = Avt \qquad (5.2)$$

Produsul $Av$ se numeşte **debit de volum** $Q$,

$$Q = Av = V/t \qquad (5.3)$$

Valoarea momentană a debitului de volum se determină din formula

$$Q = dV/dt. \qquad (5.4)$$

Unitatea de măsură în SI a debitului: $[Q] = [V]/[t] = \mathrm{m}^3/\mathrm{s}$.

Din formula (5.3) rezultă că prin orice secţiune a ţevii, în intervale egale de timp $t$, trebuie să curgă volume egale $V$, deoarece lichidul practic este incompresibil. Deacea printr-o secţiune cu aria mai mică lichidul curge mai repede şi invers.

Dacă (vezi fig.2) $A_1$ – aria secţiunii 1, $A_2$ – aria secţiunii 2, $\mathrm{v}_1$ – viteza fluxului în secţiunea 1, $\mathrm{v}_2$ – viteza fluxului în secţiunea 2, atunci ecuaţia fluxului (ecuaţia de continuitate) are forma

$$A_1\mathrm{v}_1 = A_2\mathrm{v}_2, \text{ sau } A\mathrm{v} = const. \qquad (5.5)$$

Prin urmare aria secţiunii transversale a ţevii este invers proporţională cu viteza $A \sim 1/\mathrm{v}$.

Deoarece $A = \pi D^2/4$, unde $D$ este diametrul interior al ţevii, ecuaţia (5.5) capătă forma

$$\mathrm{v}_1 D_1^2 = \mathrm{v}_2 D_2^2\,. \qquad (5.5a)$$

**Legea lui Bernoulli**:

Într-un flux staţionar suma presiunii statice şi dinamice rămâne constantă. Această sumă corespunde presiunii hidrostatice în lichidul imobil .

Dacă $p_1$ – presiunea statică în secţiunea 1, $p_2$ – presiunea statică în secţiunea 2, $v_1$ – viteza fluxului în secţiunea 1, $v_2$ – viteza fluxului în secţiunea 2, $h_1$ – înălţimea secţiunii 1 faţă de un nivel ales arbitrar, $h_2$ – înălţimea secţiunii 2 faţă de un nivel ales arbitrar, $p_0$ – presiunea totală, $\rho$ – densitatea lichidului, atunci lucrul $W$, consumat la variaţia vitezei $v$ şi înălţimii $h$ a lichidului, este egală cu suma variaţiei energiei potenţiale $\Delta W_p$ şi variaţiei energiei cinetice $\Delta W_c$, adică: $W = \Delta W_p + \Delta W_c$.

Pentru un element de volum $\Delta V$ avem $W = F\Delta s = pA\Delta s = p\Delta V$ ($\Delta s$ – deplasarea) de unde

$$(p_1 - p_2)\,\Delta V = mg(h_2 - h_1) + m((v_2)^2 - (v_1)^2/2.$$

Împărţind la $\Delta V$ , ceia ce se permite, deoarece volumul rămâne neschimbat, datorită incompresibilităţii lichidelor, obţinem

$$p_1 - p_2 = \rho\, gh_2 - \rho\, gh_1 + \rho\,((v_2)^2 - (v_1)^2/2.$$

Trecând termenii cu aceeaşi indici într-o parte, obţinem **ecuaţia Bernoulli**

$$p_1 + \rho\, gh_1 + \rho(v_1)^2/2 = p_2 + \rho\, gh_2 + \rho\,(v_2)^2/2,$$
$$p + \rho\, gh + \rho\, v^2/2 = p_0 = const. \qquad (5.6)$$

Suma presiunii statice $p$, presiunii determinate de înălţimea coloanei de lichid $\rho gh$, şi presiunii dinamice $\rho\, v^2/2$ rămâne constantă dea lungul liniei de curent. Formula (5.6) este valabilă numai pentru lichidele ideale, în care lipseşte frecarea.

Dacă lichidul curge practic la aceeaşi înălţime, atunci formulele (5.6) se simplifică:

$$p_1 + \rho(v_1)^2/2 = p_2 + \rho\,(v_2)^2/2,$$
$$p + \rho\, v^2/2 = p_0 = const. \qquad (5.7)$$

Folosind ecuaţia lui Bernoulli (5.7) şi ecuaţia de continuitate (5.5a) putem calcula viteza fluidului:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho\left[1 - (D_2 / D_1)^4\right]}} \tag{5.8}$$

şi determina debitul de volum *Q*, adică cantitatea de fluid care trece într-o unitate de timp prin secţiunea ţevii:

$$Q = v_2 \frac{\pi D_2^2}{2} = \frac{\pi D_2^2}{2} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho\left[1 - (D_2 / D_1)^4\right]}} \ . \tag{5.9}$$

Debitul fluidului poate fi măsurat direct cu ajutorul unui vas calibrat (determinăm volumul) şi a unui cronometru. Comparând valoarea debitului măsurat direct cu valoarea calculată conform formulei (5.9) verificăm veridicitatea ecuaţiei lui Bernoulli.

## Descrierea instalaţiei

În Fig. 3 este prezentată instalaţia pentru verificarea experimentală a ecuaţiei lui Bernoulli. Ea constă dintr-un suport pe care se fixează orizontal o ţeavă cilindrică din sticlă, care în partea cea mai largă are diametrul interior $D_1$, iar în partea cea mai îngustă are diametrul interior $D_2$. Un capătul al ţevii se conectează la sursa de apă, iar prin celălalt capăt apa se scurge intr-un vas calibrat. Diferenţa de presiune creată de fluxul de apă cu viteza $v_1$ din partea largă a ţevii şi viteza $v_2$ din partea îngustă se măsoară cu ajutorul tuburilor manometrice.

## Mersul lucrării:

1. Conectaţi un capăt al ţevii la sursa de apă şi măsuraţi diferenţa de înălţime dintre braţele manometrice $\Delta h = h_1 - h_2$. Calculaţi diferenţa de presiune dintre secţiunile ţevii după formula:

$$p_1 - p_2 = \rho\, g\, \Delta h,$$

unde $\rho$ este densitatea apei la temperatura camerei.

2. Calculaţi debitul apei conform formulei (5.9), pentru diametrul interior $D_1$ şi diametrul interior $D_2$.

3. Măsuraţi cu cronometru timpul $t$ în decursul căruia în vasul calibrat, plasat sub capătul ţevii, curge volumul $V$ de apă şi conform formulei $Q_{exp} = V/t$ determinaţi debitul apei.

4. Repetaţi experimentul pentru diferite debite ale apei.

5. Calculaţi erorile relative şi cele absolute pentru debitul determinat experimental $Q_{exp}$ şi pentru debitul $Q$ calculat conform formulei (5.9).

6. Rezultatele măsurărilor le introduceţi în tabelul 5.1.

**Tabelul 5 1**

| Nr. exp | Δh, cm | V, $cm^3$ | t, s | $Q_{exp}$, $cm^3/s$ | Q, $cm^3/s$ | $Q_{exp}/Q$ | $\Delta Q_{exp}$, $cm^3/s$ | $\Delta Q_{exp}/Q_{exp}$ | $\Delta Q$, $cm^3/s$ | $\Delta Q/Q$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | | | | | |
| … | | | | | | | | | | |

7. Comparaţi debitul determinat experimental $Q_{exp}$ şi debitul $Q$ calculat conform formulei (9), verificând, astfel, veridicitatea ecuaţiei lui Bernoulli. Faceţi concluziile necesare.

**Întrebări pentru evaluarea cunoştinţelor**

1. Definiţi noţiunile: linii de curent, flux ideal, flux staţionar, debit de volum, presiune statică, presiune dinamică, presiune totală.
2. Deduceţi ecuaţia de continuitate (5.5a).
3. Analizaţi graficele dependenţei presiunii lichidului ca funcţie de viteză din Fig.5.3 şi a dependenţei presiunii de lungimea ţevii din Fig.5.4 şi enunţaţi legea lui Bernoulli.
4. Deduceţi ecuaţia lui Bernoulli (5.7) şi formula (5.9) pentru debitul de volum. În ce condiţii sunt valabile aceste relaţii?
5. Explicaţi metoda de verificare a veridicităţii ecuaţiei lui Bernoulli.

**Lista bibliografică:**

1. Механика и молекулярная физика: *Физический практикум. Под редакцией Иверoновой В.И.* Москва: Наука, 1967, 352стр.
2. Лабораторные занятия по физике. Под редакцией Гольдина Л.Л. Москва: Наука, 1983, 704стр

# Lucrarea de laborator nr.6

## Studierea dependenței debitului lichidului de temperatură şi vâscozitate

| Abilități | Responsabilitate și autonomie |
|---|---|
| - Să cunoască metodele de calculare ale debitului;<br>- să definească noţiunile de vâscozitate, coeficient de vâscozitate, energie de activare a moleculelor lichidului, debit;<br>- să explice dependenţa de temperatură a coeficientului de vâscozitate şi a debitului lichidelor.<br>- să determine experimental coeficientul de vâscozitate, debitul lichidelor şi energia lor de activare. | - Absolventul autonom efectuează studiul realizărilor ştiinţei şi tehnicii, stabileşte şi testează ipotezele de lucru şi prelucrează datele experimentale fiind responsabil pentru corectitudinea prelucrării datelor și rezultatele obținute. |

**Obiectivele lucrării:**

1. Determinarea variaţiei debitului lichidelor în dependenţă de vâscozitatea şi temperatura lor;
2. Determinarea vâscozității lichidelor la diferite temperaturi şi studierea dependenţei coeficientului de vâscozitate a lichidului de temperature;
3. Determinarea energiei de activare a moleculelor lichidului.

**Aparate şi accesorii**: vâscozimetru, termostat, termometru, cronometru.

**Note teoretice [1,2]**

În stare de echilibru diferite părţi ale lichidului sau gazului se află în repaos una faţă de alta. La mişcarea lor relativă apar factori care tind sa micşoreze viteza relativă, adică apar forţe de frecare (viscozitate) între straturile fluidului. Vâscozitatea sau frecarea internă în fluide este determinată de transportul de impuls al moleculelor în direcţia perpendiculară mişcării straturilor fluidului. În fiecare strat al fluidului moleculele se mişcă atât haotic (datorită mişcării termice), cât şi

orientat (datorită mişcării stratului de fluid). Diferite straturi ale fluidului, se mişcă cu viteze diferite. Nemijlocit la peretele vasului viteza de curgere a fluidului este egală cu zero, iar pe axa ţevii este maximală. Un strat ales arbitrar se mişcă mai încet decât stratul din stânga şi mai repede ca cel din dreapta.

În rezultatul mişcării termice moleculele trec dintr-un strat în altul, transportând astfel impulsul propriu al mişcării ordonate dintr-un strat în altul. În rezultatul schimbului de molecule dintre straturile care se mişcă cu viteze diferite impulsul mişcării ordonate al stratului care se mişcă mai repede se micşorează, iar a celui care se mişcă mai încet se măreşte. Aceasta înseamnă că stratul mai rapid este frânat, iar cel mai lent este accelerat. În aceasta constă mecanismul apariţiei forţei de frecare înterioare (vâscozităţii) dintre straturile fluidului ce se mişcă cu viteze diferite.

Fie că două straturi apropiate, paralele au vitezele $u_1$ şi $u_2$ şi se află la distanţa $x_1 - x_2$. Raportul $\frac{u_1 - u_2}{x_1 - x_2} = \frac{\Delta u}{\Delta x}$ caracterizează schimbarea vitezei dintre straturi ($\Delta \vec{u}$ este orientat perpendicular mişcării fluidului), el este numit şi gradientul vitezelor. Forţa de frecare este orientată în direcţie opusă vitezei fluidului. I. Newton a stabilit că valoarea acestei forţe este proporţională cu aria $S$ de contact a straturilor şi cu gradientul vitezelor:

$$F = \eta \frac{\Delta u}{\Delta x} S . \qquad (6.1)$$

Coeficientul de proporţionalitate $\eta$ din această formulă se numeşte coeficient de viscozitate dinamică al fluidului sau coeficient de frecare internă şi depinde de proprietăţile fluidului dat şi condiţiile în care acest fluid se află. Din (6.1) rezultă sensul fizic al coeficientului de viscozitate: el este egal numeric cu forţa de frecare care apare pe fiecare unitate de suprafaţă de contact dintre două straturi ce se mişcă unul faţă de altul cu gradientul vitezelor egal cu unu. În SI unitatea de măsură a coeficientului de viscozitate este $[\eta] = kg/m \cdot s$.

Coeficientul de viscozitate dinamică depinde de natura lichidului şi pentru lichidul dat odată cu creşterea temperaturii, de obicei, se micşorează. Viscozitatea are un rol considerabil în mişcarea lichidelor.

## Descrierea metodei

Determinarea experimentală a coeficientului de vâscozitate se efectuiază cu ajutorul formulei lui Poiseuille (care rezultă din legea lui Newton (6.1)), conform căreia volumul fluidului $V$ care curge prin ţevi cilindrice

$$V = (\pi \Delta p\, t\, R^4)/(8\, \eta\, l), \qquad (6.2)$$

unde $R$ – raza capilarului (cu pereţii netezi), $\Delta p$ – diferenţa de presiune la capetele capilarului, $t$ –timpul curgerii fluidului, $l$ - lungimea capilarului, $\eta$ – vâscozitatea dinamică a fluidului (coeficientul de frecare internă). Formula lui Poiseuille este valabilă numai pentru curgerea laminară a lichidului pentru care este prezentă frecarea internă (viscozitatea), dar fără formarea turbulenţelor.

Deoarece măsurarea directă a coeficientului de vâscozitate este dificilă, putem compara timpul curgerii a două volume egale de lichid diferit, unul din ele servește ca etalon (de obicei apa) cu coeficientul de vâscozitate cunoscut. În acest scop se folosește vâscozimetru (Fig. 6.1).

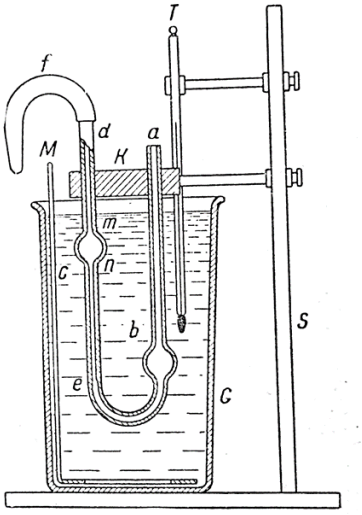



**Fig.6.1. Instalaţia experimentală**

El prezintă un tub din sticlă de forma – *U*. Braţiul *a*, conectat la o pompa, serveşte pentru umplerea cu lichid a porţiunii *em*, iar braţul *d* este pentru măsurare. Partea *ec* prezintă un tub capilar prin care se mişcă lichidul, marcajele *m* şi *n* se află mai sus şi, respectiv, mai jos de partea sferică şi delimitează volumul lichidului scurs. Fie că $t_1$ este timpul scurgerii licidului cercetat în volumul *mn*, $t_2$ este timpul scurgerii aceluiaşi volum al lichidului etalon.

Utilizând formula lui Poiseuille pentru ambele lichide obţinem:

$V = (\pi \Delta p_1 t_1 R^4)/(8 \eta_1 l)$ (6.3) şi $V = (\pi \Delta p_2 t_2 R^4)/(8 \eta_2 l)$ (6.4)

Egalând părţile drepte ale relaţiilor (6.3) şi (6.4) obţinem condiţia pentru determinarea coeficientului de vâscozitate a lichidului studiat:

$$\eta_1 = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} \cdot \frac{t_1}{t_2} \cdot \eta_2 \ , \tag{6.5}$$

unde $\eta_2$ - coieficinetul de viscozitate a lichidului etalon, este o mărime cunoscută. Deoarece în tubul vertical *ce* lichidul curge numai sub acţiunea forţei de greutate $\Delta p = \rho g h$, unde $\rho$ – densitatea lichidului, $h$ – înălţimea coloanei de lichid, $g$ = 9,81 m/s$^2$ – acceleraţia căderii libere şi $\Delta p_1 / \Delta p_2 = \rho_1 / \rho_2$. Astfel obţinem formula de lucru pentru coeficientul de viscozitate a lichidului cercetat:

$$\eta_1 = \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{t_1}{t_2} \cdot \eta_2 . \tag{6.6}$$

Mărimile $\eta_2, \rho_1, \rho_2$ se iau din tabele, iar $t_1$ şi $t_2$ se determină experimental.

Utilizând formula lui Pouaseille (6.2), dependenţa debitului lichidului $Q = V / t$ de vâscozitatea lui se calculează conform formulei

$$Q = \frac{\pi \Delta p R^4}{8 \eta l} .$$

Deoarece $\Delta p = \rho g h$, unde $\rho_1$ – densitatea lichidului, $h$ – înălțimea coloanei de lichid în capilar ( $h=l$), obţinem formula de lucru pentru calcularea debitului:

$$Q = \frac{\pi g R^4}{8} \cdot \frac{\rho}{\eta}, \tag{6.7}$$

în această formulă variază în funcţie de temperatură raportul $\rho / \eta$. Dependenţa densităţii lichidului $\rho$ de temperatură se calculează conform formulei:

$$\rho = \rho_0 / (1 + \beta \cdot t), \tag{6.8}$$

unde $\rho_0$ – densitatea lichidului la temperatura de 0◦C, iar $t$ – temperatura lichidului în condiţiile experimentului în grade ◦C, iar $\beta$ – coeficientul dilatării volumetrice a lichidului (mărime tabelară).

Dependența vâscozității lichidului $\eta_1$ de temperatură se determină experimental,

introducând viscozimetrul într-un vas cu apă, temperatura căreia poate varia, (Fig.6.1), datorită conexiunii cu un termostat, care încălzeşte apa din vas până la diferite temperaturi.

Se cunoaşte că dependenţa de temperatură a coeficientului de viscozitate a lichidului are forma

$$\eta = A \exp(\Delta E / kT), \tag{6.9}$$

unde $A$- o constantă care depinde de proprietăţile lichidului dat, $\Delta E$ este adâncimea gropii potenţiale în care se află fiecare moleculă în lichid, numită şi energia de activare a moleculelor (mărime caracteristică substanţei date), $k$ = 1,38 $\cdot 10^{-23}$ J/K, constanta lui Boltzmann, $T$ – temperatura absolută a lichidului. Conform aceste formule vîscozitatea lichidului se micşorează brusc odată cu creşterea temperaturii.

În lichide, ca şi în cristale, fiecare moleculă se află în groapa potenţială a câmpului electric creat de moleculele vecine. Moleculele oscilează cu frecvenţa medie apropiată de frecvenţa oscilaţiilor atomilor în corpurile cristaline (~$10^{12}$

Hz) şi cu amplitudinea determinată de dimensiunea volumului pus la dispoziţie de moleculele vecine. Adâncimea gropii potenţiale în lichide este mai mare ca energia cinetică medie a moleculei oscilante, de aceia moleculele oscilează în jurul unor poziţii de echilibru relativ stabile. Dar această diferenţă de energii în lichide nu este mare, de aceia moleculele deseori sar din groapa sa potenţială şi ocupă un loc în alta.

Energia de activare este determinată de faptul că moleculele în lichid se pot deplasa încet, rămânând un interval oarecare de timp în jurul unor poziţii de echilibru şi formând o reţea cristalină care variază lent în timp. Pentru a trece în alt loc molecula trebuie să depăşească regiuni cu o energie potenţială mai mare decât energia mişcării termice a moleculelor. Pentru aceasta, energia termică a moleculei trebuie să crească cu o mărime $\Delta E$ numită energia de activare. Aceasta creştere se realizează datorită fluctuaţiilor. Ca rezultat, trecerea moleculelor dintr-o poziţie de echilibru în alta are loc destul de rar şi dacă energia de activare este mare această trecere este şi mai rară. Acest fapt explică viscozitatea mare a lichidelor (în comparaţie cu gazele), deoarece în cazul lichidelor trecerea moleculelor dintr-un strat mobil în altul este substanţial încetinită din cauza forţelor mari de interacţiune dintre molecule. Odată cu creşterea temperaturii creşte şi energia termică a moleculei, ca rezultat, trecerea moleculelor dintr-o poziţie de echilibru în alta are loc mai repede şi, respectiv, se micşorează vâscozitatea.

Logaritmând expresia (6.9) obţinem

$$\ln \eta = \ln A + \frac{\Delta E}{k} \cdot \frac{1}{T} \tag{6.10}$$

din (6.10) se ve de că $\ln \eta = f(1/T)$, $\ln \eta$ ca funcţie de temperetura inversă, reprezintă o linie dreaptă ( $y = ax + b$, $y = \ln \eta, a = \frac{\Delta E}{k}, x = \frac{1}{T}, b = \ln A$). Construind graficul funcţiei $\ln \eta = f(1/T)$ vom obţine o linie dreaptă.

Determinând unghiul ($\alpha$) dintre această dreaptă şi axa absciselor vom găsi energia de activare a moleculei lichidului studiat. Într-adevăr:

$$\frac{\Delta(\ln\eta)}{\Delta(1/T)} = \frac{\Delta E}{k} = tg\alpha \text{, deci } \Delta E = k \cdot tg\alpha . \qquad (6.11)$$

**Mersul lucrării**

1. Pompaţi atent lichidul din vâscozimetru mai sus de linia de marcaj *m* (capătul braţului *d* se închide). Deschideţi capătul braţului *d* şi în momentul când lichidul ajunge la linia *m* includeţi cronometru şi deconecţi-l atunci când lichidul ajunge în dreptul liniei de marcaj *n* (ceia ce corespunde scurgerii lichidului prin capilarul *ce*), determinând astfel timpul scurgerii lichidului $t_1$ la temperatura dată. Cu ajutorul termometrului determinaţi temperatura $t^\circ$ în grade Celsius. Temperatura absolută $T$ se măsoară în grade Kelvin conform reaţiei $T = t^\circ + 273{,}15$. Efectuaţi măsurările de trei ori. Înscrieţi în tabelul 6.1 datele obţinute.

2. Conectaţi încălzitorul termostatului, când temperatura apei din termostat se va ridica cu $10^\circ$, deconectaţi încălzitorul şi porniţi motorul termostatului pentru a pompa apă în vasul în care se află viscozimetru. Pompaţi apa astfel încât viscozimetru cu lichidul cercetat să se afle în întregime scufundat în apă pe durata măsurării timpului de scurgere, apoi opriţi motorul. Aşteptaţi 1-2 minute pentru ca datorită schimbului de căldură lichidul din vâscozimetru să se încălzească până la temperatura apei din vas, apoi determinaţi timpul de scurgere şi temperatura lichidului în acelaşi fel ca şi în punctul 1. Efectuaţi măsurările de trei ori. Înscrieţi în tabelul 6.1 datele obţinute. Scurgeţi apa din vas.

3. Repetaţi experimentul din punctul 2 încălzind apa de fiecare dată cu $10^\circ$ mai mult, până la $60^\circ$C. Înscriind datele obţinute în tabelul 1.

4. Determinaţi densitatea lichidului cercetat $\rho_1$ conform formulei $\rho_1 = \rho_0 / (1 + \beta \cdot t\circ)$, înscriind datele obţinute în tabelul 6.1.

5. Găsiţi din tabelul 6.2 densitatea apei $\rho_2$ la temperatura experimentului, pentru o precizie mai mare, conform datelor din tabelul 6.2, construiţi graficul dependenţei densităţii apei în intervalul de temperaturi de la 35ºC la 60ºC, găsiţi din el densitatea apei $\rho_2$ la temperatura experimentului şi înscrieţi datele obţinute în tabelul 6.1.

6. Conform tabelului 6.3 construiţi graficul dependenţei coeficientului de viscozitate $\eta_2$ al apei în intervalul de temperaturi de la 30ºC la 60ºC şi determinaţi valoarea coeficientului de viscozitate $\eta_2$ la temperatura experimentului, înscriind datele obţinute în tabelul 6.1.

7. Timpul scurgerii apei prin capilar- $t_2$, la temperatura experimentului, se determină experimental, conform metodei descrise în punctul 1 şi construind graficul dependenţei timpului scurgerii apei prin capilar- $t_2$ de temperatură. Introduceţi datele în tabelul 6.1.

8. Înlocuiţi datele în formula (6.6) şi determinaţi coeficientul de viscozitate $\eta_1$ a lichidului la diferite temperaturi. Introduceţi datele în tabelul 6.1.

9. Construiţi graficul dependenţei coeficientului de viscozitate al lichidului $\eta_1$ ca funcţie de temperatura exprimată în grade Celsius $t^\circ$, $\eta_1 = f(t^\circ)$. Analizaţi această dependenţă.

10. Calculaţi $\ln\eta$ şi $1/T$ ($T = t^\circ + 273$) şi construiţi graficul dependenţei $\ln\eta = f(1/T)$ Determinaţi din grafic $tg\alpha$ şi conform relaţiei $\Delta E = k \cdot tg\alpha$ valoarea energiei de activare a moleculei lichidului studiat. Comparaţi valoarea energiei de activare cu energia termică ~ $kT$. Analizaţi rezultatele obţinute.

11. Calculaţi debitul lichidului cercetat $Q_1$ şi al apei $Q_2$ la diferite temperaturi conform formulei (6.7), introduceţi datele în tabelul 1 şi construiţi

graficul dependenţei dintre debitul lichidului $Q$ şi vîscozitatea lui $\eta$ pentru ambele luchide. Analizaţi rezultatele obţinute.

12. Calculaţi eroarea relativă şi cea absolută a coeficientul de viscozitate a lichidului $\eta_1$, a energiei de activare a moleculei lichidului $\Delta E$ şi a debitului. Înscrieţi rezultatele în forma standard.

**Tabelul 6.1**

| *Nr.exp* | *t,* ℃ | $t_1$,s | $t_2$,s | *1/T,* $K^{-1}$ | $\rho_1$, $kg/m^3$ | $\rho_2$, $kg/m^3$ | $\eta_2$, Pa·s | $\eta_1$, Pa·s | $ln\eta$ | $Q_1$, $m^3/s$ | $Q_2$, $m^3/s$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | |

**Tabelul 6.2**

**Densitatea apei distilate la diferite temperaturi, la presiunea atmosferică normală (101,3 kPa)**

| t,ºC | ρ, $kg/m^3$ | t,ºC | ρ, $kg/m^3$ | t,ºC | ρ, $g/cm^3$ | t,ºC | ρ, $kg/m^3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 999,84 | 12 | 999,49 | 24 | 997,32 | 40 | 992,21 |
| 1 | 999,90 | 13 | 999,37 | 25 | 997,04 | 50 | 988,04 |
| 2 | 999,94 | 14 | 999,24 | 26 | 996,81 | 60 | 983,21 |
| 3 | 999,96 | 15 | 999,10 | 27 | 996,54 | 70 | 977,78 |
| 4 | 999,97 | 16 | 998,94 | 28 | 996,26 | 80 | 971,80 |
| 5 | 999,96 | 17 | 998,77 | 29 | 995,97 | 90 | 965,31 |
| 6 | 999,94 | 18 | 998,59 | 30 | 995,64 | 100 | 958,35 |
| 7 | 999,90 | 19 | 998,40 | 31 | 995,37 | | |
| 8 | 999,85 | 20 | 998,20 | 32 | 995,05 | | |
| 9 | 999,81 | 21 | 998,02 | 33 | 994,72 | | |
| 10 | 999,78 | 22 | 997,80 | 34 | 994,40 | | |
| 11 | 999,60 | 23 | 997,57 | 35 | 994,06 | | |

Notă. Apa are densitatea maximă la temperatura de 3,98 ºC (999,973 $kg/m^3$). S-a convenit, pentru calcule, să se ia densitatea maximă a apei (1000 $kg/m^3$) la temperatura de 4ºC.

**Tabelul 6.3**

**Vâscozitatea $\eta_e \cdot 10^{-3}$ apei la diferite temperaturi**

| t,°C | $\eta_e$, Pa·s | t,°C | $\eta_e$, Pa·s | t,°C | $\eta_e$, Pa·s |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1,79 | 21 | 0,98 | 30 | 0,80 |
| 5 | 1,51 | 22 | 0,96 | 40 | 0,65 |
| 10 | 1,31 | 23 | 0,93 | 50 | 0,55 |
| 15 | 1,14 | 24 | 0,91 | 60 | 0,47 |
| 16 | 1,11 | 25 | 0,89 | 70 | 0,41 |
| 17 | 1,08 | 26 | 0,87 | 80 | 0,36 |
| 18 | 1,06 | 27 | 0,86 | 90 | 0,32 |
| 19 | 1,03 | 28 | 0,84 | 100 | 0,28 |
| 20 | 1,00 | 29 | 0,82 | 110 | 0,26 |

**Întrebări pentru evaluarea cunoştinţelor**

1. Explicaţi mecanismul apariţiei viscozităţii în lichide şi gaze.
2. Care este sensul fizic al coeficientului de viscozitate?
3. Explicaţi metoda de lucru.
4. Deduceţi formula (6.7) pentru debitul lichidului.
5. Prin ce se deosebeşte structura lichidelor de cea a corpurilor cristaline şi gazoase şi care este sensul energiei de activare?
6. Explicaţi din ce cauză vîscozitatea lichidului se micşorează brusc odată cu creşterea temperaturii.
7. Explicaţi dependenţa dintre debitul lichidului $Q$ şi vîscozitatea lui $\eta$.

**Lista bibliografică:**


1. Механика и молекулярная физика: *Физический практикум. Под редакцией Иверoновой В.И.* Москва: Наука, 1967, 352стр.
2. Лабораторные занятия по физике. Под редакцией Гольдина Л.Л. Москва: Наука, 1983, 704стр.

# Lucrarea de laborator nr.7

## Studierea principiilor de funcţionare a contoarelor de gaz şi determinarea caracteristicilor metrologice ale contoarelor de gaz cu pereţi deformabili

| Abilităţi | Responsabilitate şi autonomie |
|---|---|
| – să cunoască cerinţele actuale faţă de aparatele de măsură a cantităţii de gaz;<br>– să cunoască metodele de determinare a caracteristicilor metrologice ale etalon de verificare a contoarelor de gaz;<br>– sa aplice prevederile actelor legislative si normative nationale in domeniul verificării, încercarii şi controlului debitului;<br>– să aplice metodele de determinare a caracteristicilor metrologice în procesul verifiării metrologice;<br>– să definească caracteristicile metrologice ale contoarelor de gaz;<br>– să descrie construcţia contoarelor de gaz cu o membrană şi două camere şi<br>– contoarelor de gaz cu două membrane şi patru camere;<br>– să cunoască parametrii diferitor tipuri de contoare de gaz;<br>– să determine experimental caracteristicile metrologice ale contoarelor de gaz. | - Absolventul autonom efectuează studiul realizărilor ştiinţei şi tehnicii, stabileşte şi testează ipotezele de lucru şi prelucrează datele experimentale fiind responsabil pentru corectitudinea prelucrării datelor și rezultatele obținute.<br>- Absolventul participă la efectuarea autonomă a verificărilor metrologice, etalonărilor, încercărilor de laborator şi la activităţile de evaluare a conformităţii fiind responsabil de calitatea lucrărilor efectuate. |

**Obiectivele lucrării:**

1. Studierea construcției contoarelor de gaz cu pereţi deformabili;
2. Determinarea caracteristicilor metrologice ale contoarelor de gaz cu pereţi deformabili.

**Aparate şi accesorii:** contor de gaz cu pereţi deformabili convenţional de referenţă, contor de gaz cu pereţi deformabili supus testării, compresor, termometru, cronometru; contoare de gaz cu pereţi deformabili dezasamblate cu diferite tipuri de blocuri de masură şi registre (mecanisme integratoare).

## Note teoretice

*Principii de funcționare ale contoarelor de gaz.* Aparatele pentru măsurarea şi înregistrarea debitelor şi volumelor de gaze combustibile naturale se numesc *contoare*.

În *contoarele volumetrice* măsurarea are loc prin umplerea si golirea succesiva a unor compartimente cu volum determinat.

Contoarele volumetrice cu pereți deformabili se confecționează cu una sau două membrane (diafragme), şi în dependență de aceasta, cu două sau patru camere. Gazul prin aceste camere se distribuie cu ajutorul sertarelor sau a supapelor. Sertarul de distribuție se utilizează numai în contoarele cu doua membrane, iar supapele se utilizează atât în contoarele cu o membrană cât şi în cele cu două membrane.

Cele mai răspândite sunt contoarele de gaz cu doua membrane şi sertăraș de distribuire a gazului, şi, de asemenea, cele cu o singura membrană şi supape de distribuție. Contoarele cu pereții deformabili se utilizează pentru măsurarea cantităților de gaze pure şi uscate.

Contoarele cu membrană (diafragmă) lucrează după principiul divizorilor de formație, camerele sunt separate de membranele flexibile, care nu permit pătrunderea gazului dintr-o cameră în alta. Deplasarea membranelor are loc datorită diferenței de presiune dintre intrarea în contor (amonte) şi ieșirea din el (aval).

Umplerea camerelor se face cu ajutorul sertărașului de distribuție sau a supapelor şi a mecanismului de transmisie care pune în funcțiune mecanismul de integrare. Mecanismul de integrare este situat într-o carcasă din masă plastică şi în el gazul nu pătrunde.

Un contor de gaz cu pereții deformabili trebuie sa posede următoarele proprietăți:

- exactitate stabilă in perioada dintre verificări;
- pierderi minimale de presiune a gazului;

- rezistență anti incendiară;
- capacitate de lucru nu mai puțin de douăzeci ani.

1. *Contoare de gaz cu o membrană şi două cam**ere** (Fig.7.1)*

Părţile principale ale acestor contoare sunt carcasa *1*; mecanismul de distribuire a gazului, format din supapele *2* şi *3*, membrana sau diafragma cu pereții flexibili *4*, discul metalic *5*, camera superioară *6* şi inferioară *7* de măsurare şi mecanismele de transmisie şi de integrare, care nu sunt aratate în Figura 7.1. Carcasa reprezintă un cilindru ermetic închis, care are în interior două camere de distribuire şi măsurare a gazului (camera superioară *6* şi inferioară *7*) şi cu racorduri de intrare şi ieşire (ţevi pentru unirea la conducta de gaz). Camerele sunt despărțite de membrana mobilă cu pereţii flexibili *4*. Membrana se confecționează în formă de diafragmă elastică din piele sau material sintetic. În centrul membranei este fixat un disc metalic 5, care se mișcă pe verticală, dea lungul axei cilindrului.

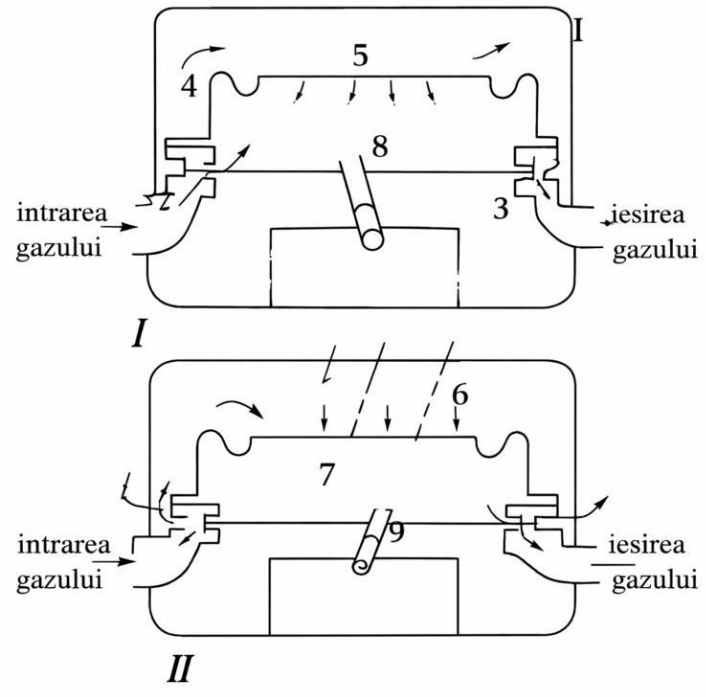



**Fig.7.1. Contor de gaz cu pereţi deformabili**

Acest disc menține constant volumul camerelor de măsurare. În ultimul timp diafragmele din piele nu se fabrică, deoarece pielea se supune compresării şi dilatării în procesul exploatării; prezența benzolului în gaz duce la deteriorarea suprafeței pielii, în rezultatul, pielea se usucă şi contorul iese din funcțiune sau indicațiile lui sunt mult mărite.

În camerele de distribuire a gazului sunt montate supapele *2* şi *3* cu suport elastic, legate cu un mecanism de pârghie *8*, care este pus în funcțiune de membrana mobilă cu disc. Funcționarea contorului se bazează pe deplasarea membranei mobile sub acțiunea diferenței de presiune a gazului, până la contor (în amonte) şi după el (în aval) şi comutarea mecanismului de distribuire a gazului (supapele cu suport elastic *2* şi *3*, unite prin mecanismul de pârghie *8*) sub acțiunea membranei. Datorită deplasării supapelor pe orizontală, ele se închid şi se deschid astfel încât dacă intrarea gazului în contor are loc în cameră superioară de măsurare, atunci el iese din contor din camera inferioară şi invers. Intrarea şi ieşirea gazului se efectuează consecutiv în camera superioară şi cea inferioară. Spre exemplu, în Fig. 7.1 (I) supapele sunt aranjate astfel încât gazul pătrunde în camera inferioară *7* şi simultan iese din camera superioară *6*, în acest caz gazul va împinge membrana cu disc vertical în sus, ajungând în poziția superioară de sus membrana şi discul vor deplasa supapele pe orizontală spre dreapta (Fig. 7.1 (II)), în această poziție gazul pătrunde în camera superioară *6* şi simultan iese din camera inferioară *7*, în acest caz gazul va împinge membrana cu disc vertical în jos, ajungând în poziţia minimă de jos membrana şi discul vor deplasa supapele pe orizontală spre stânga şi ciclul se repetă. Astfel intrarea şi ieşirea gazului este continuă, datorită alternării camerelor.

La fiecare mişcare a membranei mobile în sus şi în jos se expulzează două volume de gaz care în sumă corespund volumului camerei de măsurare (suma volumului camerei superioare şi celei inferioare). Volumul camerei de măsurare sau volumul ciclic a contorului este o mărime normată pentru fiecare

tip de contor, ea este una din caracteristicile principale ale contorului şi se indică în paşaportul lui tehnic şi pe mecanismul de citire.

Membrana mobilă, prin intermediul supapelor şi sistemului de pârghii, pune în funcțiune mecanismul de transmisie care se unește la axul *9*. La rândul său mecanismul de transmisie pune în mişcare mecanismul integrator (transmiterea mișcării de rotaţie între blocul de măsură şi registru (mecanismul integrator), se face printr-un cuplaj magnetic), care indică cantitatea sumară de gaz care a trecut prin contor în $m^3$. Astfel mecanismul integrator numară oscilațiile membranei (fiecărei oscilaţii îi corespunde un volum stabilit de gaz) şi transformă numărul de oscilaţii în $m^3$.

Supapele în timpul funcțiunii contorului trebuie să comuteze cât mai repede posibil, deoarece în timpul comutării gazul trece direct spre ieșire. Această cantitate de gaz necontorizată de către mecanismul integrator este cu atât mai mare, cu cât mai mare este debitul gazului care trece prin contor, din această cauză contoarele de acest tip se utilizează, în special, de către utilizatorii casnici pentru măsurarea debitelor mici de gaz. Contoarele cu supape pentru debite mari de gaz sunt foarte voluminoase, iar supapele în acest caz, practic nu reușesc să se închidă ermetic din cauza frecvenței mari de oscilații şi gazul iese necontorizat.

***2***. *Contoare de gaz cu două membrane şi patru camere (Fig.7.2)*

Aceste contoare sunt compuse dintr-un bloc de măsură amplasat într-o carcasa de oţel *-1,* prevăzută cu două racorduri (intrare-ieșire). Unitatea de măsură este construită din două camere - *2,3* special proiectate, fiecare cameră având cate o membrană sintetica *-4*, care divizează camera în două părți-interioară şi exterioară.

Contorul este pus în funcțiune de diferența de presiune dintre ramura amonte şi cea din aval. Un sistem de distribuție cu sertar rotativ sau supape *-11* şi un sistem bielă-manivelă *6,* asigura transformarea mișcării alternative (oscilație pe

orizontală) a celor două membrane, în mișcare de rotaţie, transmisă indexului contorului -*9*. Transmiterea mișcării de rotație între blocul de măsură şi registru, se face printr-un cuplaj magnetic, această soluție asigurând un înalt grad de etanșeitate al carcasei. Montajul se face in poziție verticală, într-un punct mai înalt al rețelei, pentru protecția împotriva formării condensului.

Contoarele volumetrice cu două membrane şi patru camere (Fig.7.2) sunt destinate pentru evidenţa consumului de gaze de către utilizatorii casnici. Aceste contoare se utilizează pentru măsurarea unor debite mici de gaz.

Contorul este constituit din următoarele componente:

- *1* - carcasă ermetică;
- *2* , *3* - doua camere divizate fiecare cu ajutorul unei membrane încă în două părți;
- *4* -diafragme (membrane) sintetice;
- discul metalic *5*;
- mecanismul biela-manivelă *6*;
- repartizatorul de gaz *7*;
- mecanismul de ajustare precisa *8*;
- mecanismul de integrare *9*;
- mecanismul de transmisie *10*;
- două supape de comutație *11* sau, după caz, sertărașe;

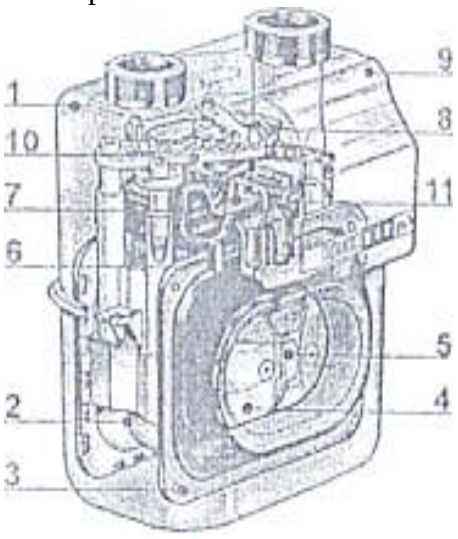



**Fig. 7.2. Contor cu diafragmă**

Aceste contoare se refera la dispozitiv de tip uscat cu patru camere funcționale. Camerele de măsurare sunt introduse într-un corp ermetic, ele sunt separate prin diafragme, care se confecționează din piele sau material sintetic. Funcționarea contorului se bazează pe deplasarea diafragmelor sub acțiunea diferenței de presiune a gazului până şi după contor, şi pe baza închiderii şi deschiderii (comutării) supapelor sau sertărașelor legate cu diafragmele.

Principiul de funcționare al acestor contoare este prezentat în Fig. 7.3. Gazul intră în contor prin racordul *1*, pătrunde deasupra sertărașelor *8* şi *9*, care în Fig. 7.3 sunt deschise astfel, încât gazul intră în partea interioară a camerei *4* şi în partea exterioară a camerei *5*(camerele sunt separate de peretele *10*), presând membranele *6* şi *7* şi deplasându-le pe orizontală spre stânga. Concomitent, membranele vor presa gazul aflat în cealaltă jumătate a camerei (partea exterioară a camerei *4* şi partea interioară a camerei *5*) şi-l vor scoate din contor prin racordul de ieșire *2* (conexiunea cu racordul de ieșire nu este prezentată în Fig. 7.3).

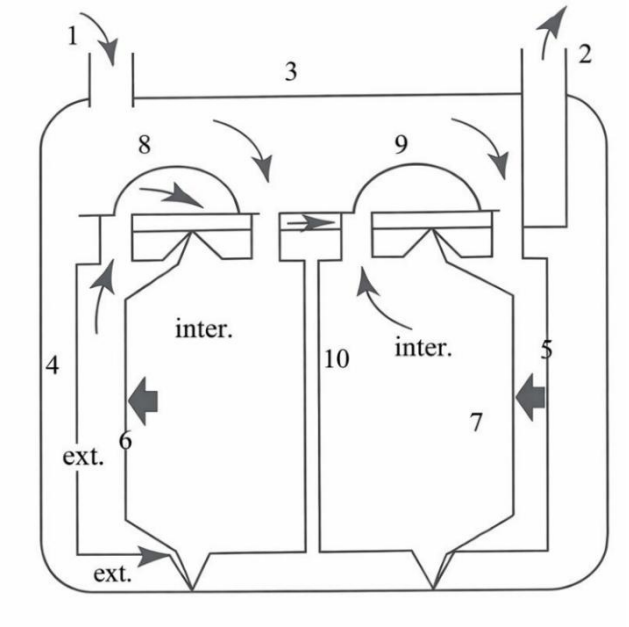



**Fig.7.3. Contor de gaz cu două membrane şi patru camere**

Membranele sunt conectate cu sertărașele sau supapele, astfel că deplasarea membranelor spre stânga cauzează comutarea supapelor şi gazul va intra de acum în partea exterioară a camerei *4* şi în partea interioară a camerei *5*, presând membranele *6* şi *7* şi deplasându-le pe orizonală spre dreapta ceia ce va determina ieșirea gazului din partea interioară a camerei *4* şi partea exterioară a camerei *5*, adică situație inversă față de cea prezentată în Fig. 7.3.

Apoi ciclul se repetă. La fiecare ciclu, din contor iese o cantitate bine determinată de gaz (volumul ciclic), egală cu volumul sumar al ambelor camere *4* şi *5*. Gazul intră şi iese consecutiv din ambele camere în mod continuu, asigurându-se, astfel, aprovizionarea

Fig.7.3. Contor de gaz cu două membrane şi patru camere neîntreruptă cu gaz. Sertărașele sau supapele transmit prin intermediul mecanismului de transmisie mișcarea de oscilație pe orizontală a membranelor mecanismului de integrare care indică cantitatea sumară de gaz care a trecut prin contor în $m^3$. Astfel mecanismul integrator numără oscilațiile membranelor (fiecărei oscilații îi corespunde un volum stabilit de gaz) şi transformă numărul de oscilații în $m^3$.

Contoarele se instalează conform săgeții de pe carcasa fiecărui contor, care indică direcția de curgere a gazului.

## Caracteristici metrologice ale contoarelor de gaz [3,4]:

*Clasa de precizie* este una din caracteristicile mijloacelor de măsurare care reflectă nivelul de precizie şi reprezintă setul de caracteristici metrologice.

*Fiabilitatea* este una din caracteristicile principale ale contoarelor. Indicele de bază al fiabilității este timpul în decursul căruia dispozitivul menţine precizia necesara. Acest timp depinde de construcţia dispozitivului şi condiţiile de utilizare.

*Debit minimal ($Q_{min}$):* debitul (volumul într-o unitate de timp) cel mai mic la care contorul trebuie să funcționeze corespunzător (nu întrece eroarea maximă admisă) în condiţii normale de utilizare.

*Debit maximal ($Q_{max}$):* debitul cel mai mare la care contorul trebuie să funcționeze corespunzător în condiţii normale de utilizare.

Contorul trebuie să funcționeze la debitul maxim intervalul de timp care este prevăzut în actele normative (de regulă nu mai mult de o oră în 24 ore), fără

ca modificările caracteristicilor metrologice să depășească limitele prescrise în aceste documente.

Toate tipurile de contoare utilizate (cu pereţi deformabili, pistoane rotative, cu turbină sau ultrasunet) trebuie sa asigure o funcţionare corectă şi în cazul depăşirii (măsurării) debitului cu 1,2 $Q_{(max)}$ timp de minimum o oră.

*Debitul de tranzit* $Q_{(t)}$ este debitul care desparte domeniul de debit în două zone distincte avînd erori maxime admise diferite.

Valoarea debitului de tranzit este în funcţie de raportul $Q_{(max)}/Q_{(min)}$ şi variază de la 0,05 $Q_{(max)}$ până la 0,20 $Q_{(max)}$. Spre exemplu – pentru $Q_{(min)} \leq Q < Q_{(t)}$, eroarea maximă este de ± 2%; – pentru $Q_{(t)} < Q \leq Q_{(max)}$, eroarea maximă este de ± 1%.

*Debitul nominal* ($Q_n$)*:* debitul la care contorul funcționează un interval mare de timp cu eroarea măsurării ce nu întrece limitele stabilite, iar diferența de presiune nu creează în contor forțe care să cauzeze uzarea rapidă a pieselor aparatului.

*Debit caracteristic:* cantitatea de substanță, care trece prin contor într-o oră la flux staţionar al gazului şi la pierderea de presiune de 1 bar.

*Eroarea indicațiilor (tolerată):* diferența dintre indicația unui contor $V_i$ şi valoarea convențional adevărată a măsurandului $V_{ca}$ (indicaţia mijlocului de măsură etalon).

De regulă, se utilizează eroarea relativă, adică raportul dintre eroarea indicațiilor şi valoarea convențional adevărată ($V_{ca}$) în %.

$$\delta = \frac{V_i - V_{ca}}{V_{ca}} - \Delta) \cdot 100\% \text{ ,}$$

$$\Delta = \frac{\Delta p V_i}{p V_{ca}}$$

unde $V_i$ este volumul indicat de contorul testat, iar , unde $\Delta p$ este diferența presiunilor absolute dintre contorul etalon şi contorul testat, $p$ – presiunea absolută a contorului testat.

Contoarele de gaz trebuie să fie proiectate şi construite în aşa fel încât erorile indicațiilor să se încadreze în limitele erorilor maxime tolerate, în condiții normale de funcționare (temperatura şi presiunea normală a gazului ).

*Presiunea de lucru, p* (Pa): diferența dintre presiunea absolută a gazului la intrarea în contor şi presiunea atmosferică.

*Presiunea maximă admisă,* $P_{max}$ (Pa): presiunea maximă a gazului la care contorul furnizează indicaţii care satisfac cerinţele cu privire la erorile maxime admise.

*Pierderea de presiune,* $\Delta_p$ (Pa): diferența dintre valoarea presiunii gazului la intrarea în contor şi valoarea presiunii gazului la ieşirea din contor la un debit dat. Ea este determinată de rezistența mecanică şi hidraulică a pieselor contorului. Pierderea de presiune admisă trebuie precizată în normele specifice fiecărui tip constructiv de contor.

*Prag de sensibilitate:* debitul minimal începând cu care contorul dă indicații cu orice eroare. Pragul de sensibilitate caracterizează rezistența mecanică a contorului, care depinde de construcția părții de măsurare şi de calitatea confecționării si asamblării pieselor aparatului.

*Volumul, V* ($m^3$) cantitatea de gaz care trece prin contor, fară a ţine seama de timpul de curgere.

Contorul de gaz trebuie să fie prevăzut cu un dispozitiv de afișare a indicațiilor de măsurare care trebuie să indice direct volumul de gaz măsurat în metri cubi. Pe cadran trebuie să fie inscripționat simbolul $m^3$.

*Volumul ciclic*: volumul de gaz emis de contor în intervalul de un ciclu funcțional, indică ansamblul mișcărilor pieselor mobile ale contorului, la sfârșitul cărora toate acestea, cu excepția dispozitivului indicator, își reiau pentru prima dată poziția pe care au avut-o în momentul inițial. Acest volum este determinat prin multiplicarea valorii volumului corespunzător unei rotații complete a elementului de control sau valoarea cea mai mică a diviziunii cu

raportul de transmitere al dispozitivului de măsurare la dispozitivul indicator al mecanismului..

*Volumul mecanismului de contorizare*: cantitatea maximă de gaz care poate fi calculată de contor.

*Preţul celei mai mici diviziuni* a contorului: valoarea cea mai mică a diviziunii exprimată în unităţi de volum.

*Calibrul:* diametrul interior al racordului de intrare al contorului în mm. La momentul dat se confecționează contoare cu următoarele calibre: 15, 20, 25, 32, 40, 50, 60,70, 80, 100, 125, 150, 200, 250, 300 si 400 *mm*.

*3. Caracterizarea diferitor tipuri de contoare de gaz*

*Contoarele de gaz Gallus 2000* **(**Fig.7.4), sunt de tip uscat cu pereți deformabili din material elastic. Fac parte din categoria mijloacelor de măsurare de tip volumetric şi sunt destinate măsurării consumurilor de gaze. Au proprietățile:

- construcție rezistentă la foc
- design compact
- nivel redus de zgomot
- aprobare OIML si EEC in peste 25 de tari
- utilizate pentru tranzacții comerciale
- posibilitate de echipare cu emițătoare de impulsuri pentru telecitire
- sensibilitate foarte bună la debite mici
- fiabilitate pe termen foarte lung (nu mai puțin de 40 ani)
- produs în
- conformitate cu ISO 9001



**Fig.7.4 Contor de gaz Gallus 2000**

Specificațiile tehnice ale contorului sunt prezentate în tabelul 7.1

**Tabelul 7.1**

| **Utilizare** | **Gaze naturale si LPG (gaz petrolier lichefiat)** |
|---|---|
| Volum ciclic | 1,2 $dm^3$ cu abaterea ± 5 % |
| Temperatura de lucru | -200°C… +500°C |
| Temperatura de depozitare | -400°C… +600°C |
| Presiunea maximă de lucru | 0,5 bar (carcasă oțel) |
| | 1,5 bar (carcasă aluminiu) |
| Domeniu de măsură | G 1.6, $Q_{min}$ = 0,016 $m^3$/h, $Q_{max}$ = 2,5 $m^3$/h |
| | G 2.5, $Q_{min}$ = 0,025 $m^3$/h, $Q_{max}$ = 4,0 $m^3$/h |
| | G 4, $Q_{min}$ = 0,04 $m^3$/h, $Q_{max}$ = 6,0 $m^3$/h |
| Eroarea tolerată | ± 2 % $2Q_{min} \leq Q < Q_{max}$ |
| | ± 3 % $Q_{max} \leq Q < 2Qmin$ |
| Transmiţător de impulsuri | Sistem LF retrofit , 12 Vdc max 10 mA max, |
| | standard 0.01 $m^3$/impuls |
| Intervalul de temperaturi ale mediului şi gazului | -30…+60˚C , la umiditatea relativă 98 % la temperatura de 25°C |
| Indicaţia maximă (Volumul mecanismului de contorizare) | 9999.999 $m^3$ |
| Conexiuni | G ¾ -B |
| Masa | 1.6 kg |
| Dimensiunile de gabarit | 217×190×162 mm |
| Preţul celei mai mici diviziuni a contorului | 0.2 $dm^3$ |
| Prag de sensibilitate | nu întrece 3 $dm^3$ /h |
| Pierderea medie de presiune pentru $Q_{max}$ | nu întrece 200 Pa |
| Pierderea maximă de presiune pentru $Q_{min}$ | nu întrece 60 Pa |

*Contor de gaz G1-RF*

Este un contor de tip volumetric, uscat, cu membrane, destinat măsurării consumului casnic de gaze naturale sau gaz petrolifer lichefiat. Corespunde normelor OIML R6, R31, SR 6681-98, NML 3-04-96 ŞI NML 3-05-96. Contorul G1-RF este construit cu rezistența la temperaturi înalte - foc ( 650-850˚C). Carcasa este din oțel ambutisat, cu vopsire în câmp electrostatic cu pulbere epoxipoliesterică, membrane cu



**Fig.7.5. Contor de gaz G1-RF**

nă calitate, realizată în regim de asigurare a calității în conformitate cu ISO 9001.

Caracteristicile tehnice ale contorului de tip dat sunt prezentate în tabelul 7.2.

**Tabelul 7.2**

| | |
|---|---|
| Volum ciclic, $V$ | 0,4 $dm^3$ |
| Debit maxim, $Q_{max}$ | 1,6 $m^3/h$ |
| Debit minim, Q | 0,016 m /h |
| Presiune maximă, $P_{max}$ | 0,5 bar |
| Intervalul de temperaturi ale mediului şi gazului | -20…+50˚C |
| Indicaţia maximă (Volumul mecanismului de contorizare) | 9999.999 $m^3$ |
| Conexiuni | G ¾ |
| Erori maxime tolerate: | ±1,5% pentru $0,1\ Q_{max} < Q < Q_{max}$<br>±3% pentru $Q_{min} < Q < 0,1Q_{max}$ (debitul de tranziţie $Q_t = 0,1\ Q_{max}$) |
| Masa | 2.2 kg |
| Dimensiunile de gabarit | 182×216×152 mm |

O întrebuințare largă în Republica Moldova o au contoarele cu membrană: Gallus 2000-Shlumberger, Elster - Germania, ROMBACH - Germania, ACTARIS - Franţa, PremaGaz-Slovacia şi, de asemenea, contoare de gaz cu membrană cu compensarea temperaturii de diferite tipuri şi dimensiuni Metris M 250.

Diapazonul de măsurare este diferit în dependență de tipul contorului:

G 1,6 $Q_{min}$= 0,016 $m^3$ / h ; $Q_{max}$=2,5 $m^3$ / h ;

G 2,5 $Q_{mn}$ = 0,025 $m^3$ / h ; $Q_{max}$=4,0 $m^3$ / h ;

G 4,0 $Q_{mn}$ = 0,040 $m^3$ / h ; $Q_{max}$=6,0 $m^3$ / h ;

G 6,0 $Q_{mn}$ =0,060 $m^3$ / h ; $Q_{max}$=10,0 $m^3$ / h ;

G 10,0 $Q_{mn}$ = 0,010 $m^3$ / h ; $Q_{max}$=16,0 $m^3$ / h ;

G 16,0 $Q_{mn}$ = 0,160 $m^3$ / h ; $Q_{max}$=25,0 $m^3$ / h ;

G 25,0 $Q_{mn}$ = 0,250 $m^3$ / h ; $Q_{max}$=40,0 $m^3$ / h ;

*Notă*: cifra pe lângă litera G este determinată de valoarea debitului minim $Q_{min.}$

## Descrierea instalației

În Fig.7.6 este prezentată instalația experimentală. Ea constă dintr-un contor de gaz cu pereţii deformabili convenţional de referenţă (etalon) *1*, contor de gaz cu pereţi deformabili supus testării *2,* fixate orizontal pe o carcasă metalică *3*, compresor *4,* unit la contorul de gaz cu pereţii deformabili convențional de referință *1;* contoare de gaz cu pereți deformabili dezasamblate *5* cu diferite tipuri de blocuri de măsură *6* şi registre (mecanisme integratoare), bloc de alimentare *7*.

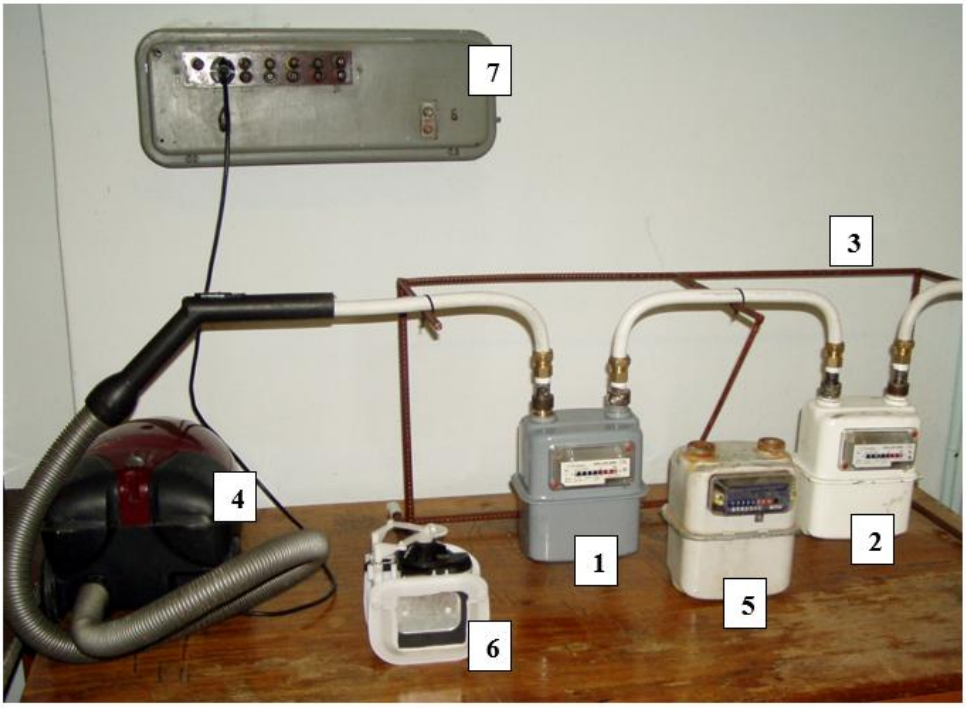



**Fig.7.6. Instalația experimentală**

## Mersul lucrării:

1. Studiați cu atenție inscripțiile de pe fiecare contor, notaţi-le şi explicaţi sensul lor. Menționăm că pe placa fiecărui contor trebuie să fie indicate:

a) data aprobării de model;

b) marca comercială a producătorului sau a firmei comerciale;

c) numărul şi anul fabricării contorului;

d) notarea contorului G cu numărul următor, stabilit de cerinţe speciale;

e) debitul maximal: $Q_{max}$ ... $m^3/h$;

f) debitul minimal: $Q_{min}$ ... $m^3/h$;

g) presiunea maximală de lucru: $P_{max}$ ...mPa (sau Pa, sau bar);

h) valoarea nominală a volumului ciclic pentru contoarele volumetrice: V... $m^3$ sau $dm^3$;

2. Studiați (Fig.7.6) contoarele de gaz dezasamblate *5* cu diferite tipuri de blocuri de măsură *6* şi registre (mecanisme integratoare), observați principiul de funcționare a fiecărui contor. Notați părțile componente ale fiecărui bloc de măsură, registru. Găsiți deosebirile şi asemănările. Determinați numărul camerelor de măsurare, tipul mecanismului de distribuire a gazului (supape sau sertăraș rotativ).

3. Notați indicațiile inițiale ale contoarelor *1* $n_{10}$, $m^3$ şi *2* $n_{20}$, $m^3$, apoi concomitent conectați compresorul *4* şi cronometrul pentru 3 minute la debitul minimal al compresorului determinând indicațiile contoarelor *1* $n_1$, $m^3$ şi *2* $n_2$, $m^3$. Determinați valorile volumului gazului $V_{ca}$ indicate de mijlocul de măsură etalon şi $V_i$ -volumul indicat de contorul testat. Introduceți datele în tabelul 7.3.

**Tabelul 7.3**

| $n_{10}$, $m^3$ | $n_1$, $m^3$ | $V_{ca}=(n_1-n_{10})$,$m^3$ | $n_{20}$, $m^3$ | $n_2$, $m^3$ | $V_i=(n_2-n_{20})$,$m^3$ | t,s | $Q_1$, $m^3/h$ | $Q_2$, $m^3/h$ | $Q_{med}$, $m^3/h$ | $\Delta V$, $m^3$ | δ% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | |

4. Determinați debitul gazului indicat de contorul etalon $Q_1$ şi debitul indicat de contorul testat $Q_2$ conform relației $Q= V/t$. Determinați valoarea medie a debitelor. Introduceți datele în tabelul 7.3.

5. Repetaţi experimentul pentru diferite debite ale gazului.

6. Calculați erorile relative δ% şi cele absolute $\Delta V$, $m^3$ conform formulelor:

$$\delta = \left(\frac{V_{i-}\, V_{ca}}{V_{ca}} - \Delta\right) \cdot 100\%,$$

$$\Delta V = V_i - V_{ca}$$

unde $\Delta = \frac{\Delta\, pV_i}{pV_{ca}}$ , $\Delta p$ este diferența presiunilor absolute dintre contorul etalon şi contorul testat, $p$ – presiunea absolută a contorului testat, luaţi $p$= 0.1 bar şi $\Delta p$ = 200 Pa, pentru $Q_{max}$ şi 60 Pa pentru $Q_{min}$ .

7. Construiți graficele dependenței erorilor absolute şi relative de debitul mediu. Faceți analiza lor.

**Întrebări pentru verificare**

1. Descrieți principiul de funcționare a contoarelor de gaz cu pereții deformabili.
2. Definiți caracteristicile metrologice ale contoarelor de gaz.
3. Caracterizați contoarele de gaz Gallus 2000 şi G1- RF.
4. Descrieți instalația experimentală.
5. Explicați sensul inscripțiilor de pe fiecare contor.
6. Numiți părțile componente ale contorului, blocului de măsură, registrului.
7. Care este cauza dependenței erorilor contoarelor de gaz de debit?

**Lista bibliografică:**


1. Механика и молекулярная физика: *Физический практикум. Под редакцией Иверoновой В.И.* Москва: Наука, 1967, 352стр.
2. Лабораторные занятия по физике. Под редакцией Гольдина Л.Л. Москва: Наука, 1983, 704стр.
3. NML 3-09:2017, Contoare de gaz cu membrană. Procedura de verificare metrologica.
4. NML 3-15:2021, Contoare de gaz cu debitul maxim până la 2500 m3 /h. Procedura de verificare metrologica.

# Lucrarea de laborator nr.8

## Studierea principiilor de funcționare ale contoarelor de apă şi determinarea caracteristicilor metrologice ale contoarelor de apă caldă

| Abilități | Responsabilitate și autonomie |
|---|---|
| – să descrie diferite tipuri de apometre;<br>– să cunoască cerințele actuale faţă de aparatele de măsură a cantității de lichide;<br>– să aplice prevederile actelor legislative si normative nationale în domeniul verificării, încercării si controlului debitului;<br>– să efectueze verificări ale mijloacelor de măsurare la instalațiile etalon;<br>– să definească caracteristicile metrologice şi tehnice ale contoarelor de apă;<br>– să descrie construcția contoarelor de apă;<br>– să cunoască clasificarea contoarelor de apă;<br>– să determine experimental caracteristicile metrologice ale contoarelor de apă şi dependența lor de temperatură şi debit. | - Absolventul autonom efectuează studiul realizărilor ştiinţei şi tehnicii, stabileşte şi testează ipotezele de lucru şi prelucrează datele experimentale fiind responsabil pentru corectitudinea prelucrării datelor și rezultatele obținute.<br>- Absolventul participă la efectuarea autonomă a verificărilor metrologice, etalonărilor, încercărilor de laborator şi la activităţile de evaluare a conformităţii fiind responsabil de calitatea lucrărilor efectuate. |

**Obiectivele lucrării:**

1.Studierea principiilor de funcționare ale contoarelor de apă;

2.Determinarea caracteristicilor metrologice ale contoarelor de apă caldă.

**Aparate şi accesorii:** contor de apă caldă convențional de referință (etalon), contor de apă caldă supus testării, termostat, termometru, cronometru.

**Note teoretice [1,2]**

*Principii de funcționare a contoarelor de apă.*

Aparatele pentru măsurarea si înregistrarea debitelor şi volumelor de apă se numesc *contoare*.

*Contorul cu palete sau apometrul* este un *contor de viteză* - aparat montat pe conducte închise, compus dintr-un organ mobil a cărui viteza depinde direct de viteza apei. Mișcarea organului mobil este transmisa mecanic sau în alt mod la dispozitivul indicator care totalizează volumul de apa trecut.

Construcția contorului cu palete este prezentată în figura 8.1.

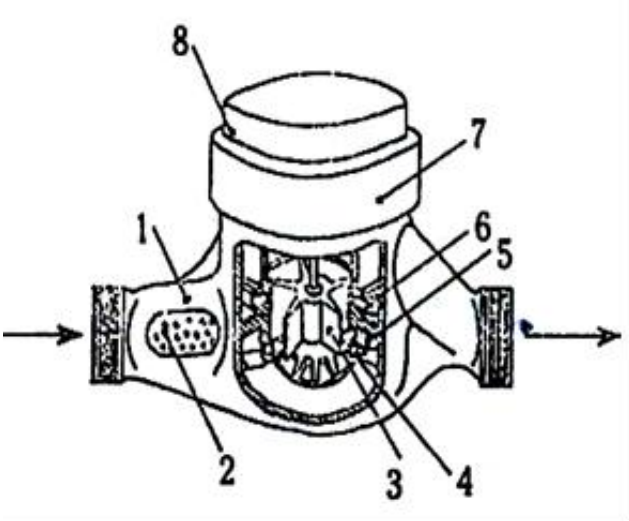



**Fig. 8.1 Contorul cu palete sau apometrul:** *1* – corp; *2* – sită; *3* – dispozitiv de măsurare; *4* – caseta; *5* – orificii calibrate; *6* – orificii; *7* – mecanism de transmitere; *8* – mecanism integrator de debit.

Corpul apometrului (*1*) este, în general turnat din bronz fosforos şi este prevăzut cu două orificii pentru intrarea, respectiv pentru ieșirea lichidului (*5*). La intrare, are montată o sită metalică (*2*) sau sită din materiale plastice cu rolul de filtrare a impurităților.

Dispozitivul de măsurare (*3*) este construit dintr-o roată cu palete, care este antrenată prin curgerea lichidului. Mecanismul de transmitere (*7*) are rolul de a prelua mișcarea de rotație și de a o transmite la dispozitivul integrator (*8*) format dintr-un cadran indicator ce totalizează lichidul trecut prin aparat.

**Caracteristici metrologice ale contoarelor de apă [3]:**

*Clasa de precizie* este una din caracteristicile mijloacelor de măsurare care reflectă nivelul de precizie şi reprezintă setul de caracteristici metrologice.

*Fiabilitatea* este una din caracteristicile principale ale contoarelor. Indicele de bază al fiabilității este timpul în decursul căruia dispozitivul menține precizia necesară. Acest timp depinde de construcția dispozitivului şi condițiile de utilizare.

*Debit minimal ($Q_{min}$):* debitul (volumul într-o unitate de timp) cel mai mic la care contorul trebuie să funcționeze corespunzător (nu întrece eroarea maximă admisă) în condiții normale de utilizare.

*Debit maximal ($Q_{max}$):* debitul cel mai mare la care contorul trebuie să funcționeze cores-punzător în condiții normale de utilizare.

Contorul trebuie să funcționeze la debitul maxim intervalul de timp care este prevăzut în actele normative (de regulă nu mai mult de o oră în 24 ore), fără ca modificările caracteristicilor metrologice să depășească limitele prescrise în aceste documente.

*Debitul de tranzit $Q_{(t)}$* este debitul care desparte domeniul de debit în două zone distincte având erori maxime admise diferite.

Valoarea debitului de tranzit este în funcție de raportul $Q_{(max)}/Q_{(min)}$ şi variază de la 0,05 $Q_{(max)}$ până la 0,20 $Q_{(max)}$. Spre exemplu – pentru $Q_{(min)} \leq Q < Q_{(t)}$, eroarea maximă este de ± 2%; – pentru $Q_{(t)} < Q \leq Q_{(max)}$, eroarea maximă este de ± 1%.

*Debitul nominal ($Q_n$):* debitul la care contorul funcționează un interval mare de timp cu eroarea măsurării ce nu întrece limitele stabilite, iar diferența de presiune nu creează în contor forțe care să cauzeze uzarea rapidă a pieselor aparatului.

*Debit caracteristic:* debitul caracteristic reprezintă cantitatea maximă de lichid care trece prin contor timp de o oră.

*Eroarea indicațiilor (tolerată):* diferența dintre indicația unui contor $V_i$ şi valoarea convențional adevărată a măsurandului $V_{ca}$ (indicaţia mijlocului de măsură etalon).

De regulă, se utilizează eroarea relativă, adică raportul dintre eroarea indicațiilor şi valoarea convențional adevărată ($V_{ca}$) în %.

$$\delta = \left(\frac{V_{i-}V_{ca}}{V_{ca}} - \Delta\right) \cdot 100\%,$$

unde $V_i$ este volumul indicat de contorul testat, iar $\Delta = \beta(t_1 - t_2)$, unde $\beta$ este coeficientul dilatării volumetrice a lichidului, iar $t_1$ este temperatura lichidului în termostat, $t_2$ este temperatura lichidului nemijlocit în contorul verificat.

Contoarele de apă trebuie să fie proiectate şi construite în așa fel încât erorile indicațiilor să se încadreze în limitele erorilor maxime tolerate, în condiții normale de funcționare .

*Presiunea de lucru, p* (Pa): diferența dintre presiunea absolută a apei la intrarea în contor şi presiunea atmosferică.

*Presiunea maximă admisă,* $P_{max}$ (Pa): presiunea maximă a apei la care contorul furnizează indicații care satisfac cerinţele cu privire la erorile maxime admise.

*Temperatura maximă admisă,* $t_{max}$ (C°): temperatura maximă a apei la care contorul furnizează indicații care satisfac cerințele cu privire la erorile maxime admise.

*Pierderea de presiune,* $\Delta_p$ (Pa): diferența dintre valoarea presiunii apei la intrarea în contor şi valoarea presiunii apei la ieşirea din contor la un debit dat. Ea este determinată de rezistența mecanică şi hidraulică a pieselor contorului. Pierderea de presiune admisă trebuie precizată în normele specifice fiecărui tip constructiv de contor.

*Prag de sensibilitate:* debitul minimal începând cu care contorul dă indicații cu orice eroare. Pragul de sensibilitate caracterizează rezistența

mecanică a contorului, care depinde de construcția părții de măsurare şi de calitatea confecționării si asamblării pieselor aparatului.

*Volumul, V ($m^3$):* cantitatea de apă care trece prin contor, fără a tine seama de timpul de curgere.

Contorul de apă trebuie să fie prevăzut cu un dispozitiv de afișare a indicațiilor de măsurare care trebuie să indice direct volumul de apă măsurat în metri cubi. Pe cadran trebuie să fie inscripționat simbolul $m^3$.

*Volumul mecanismului de contorizare*: cantitatea maximă de apă care poate fi calculată de contor.

*Prețul celei mai mici diviziuni* a contorului: valoarea cea mai mică a diviziunii exprimată în unități de volum.

*Calibrul: diametrul interior al racordului de intrare (amonte) şi de ieşire (aval) al contorului în mm sau Codificare N* a contoarelor de apă**:** valoare numerică precedată de litera majusculă N , care permite identificarea contorului conform valorilor dimensionale tabelate.

## Caracteristici tehnice ale contoarelor de apă caldă:

- domeniul de măsurare: $10^{-3} - 10^{4} m^3$;
- presiunea maximă de lucru: 10 bari;
- etanșeitatea garantată cu apa, la 16 bari, timp de 3 min.
- temperatura lichidului 30-90°C
- sensibilitate garantată: contorul înregistrează sigur debite de 2% din debitul caracteristic:
- toleranțe garantate: erori sub ±3% pentru intervalul (2-5) % din debitul caracteristic şi sub 2% pentru debite cuprinse între 5-100% din debitul caracteristic.

## Clasificarea contoarelor de apă

În funcție de valorile lui $Q_{min}$ și $Q_t$ contoarele se clasifică în patru clase metrologice (Tabelul 8.1):

**Tabelul 8.1**

| **Clasa** | **Valoarea numerică a codului contorului N** | |
|---|---|---|
| | **N<15** | **N > 15** |
| Clasa A<br>Qmin<br>$Q_t$ | 0,04N<br>0,10N | 0,08N<br>0,03N |
| Clasa B<br>Qmin<br>Qt | 0,02N<br>0,08 N | 0,03N<br>0,02 N |
| Clasa C<br>Qmin<br>$Q_t$ | 0,01 N<br>0,015 N | 0,006 N<br>0,015 N |
| Clasa D<br>Qmin<br>Qt | 0,007 5N<br>0,011 5N | —<br>— |

## Descrierea instalației experimentale

În Fig.8.2 este prezentată instalația experimentală. Ea constă dintr-un contor de apă convențional de referință (etalon) *3*, contor de apă supus testării *4*, fixate orizontal pe o carcasă metalică *7*, termostatul *1*, termometru *2*, pompa termostatului *8*, reglator de debit *9*, bloc de alimentare *5*, și blocul de comandă *6*.

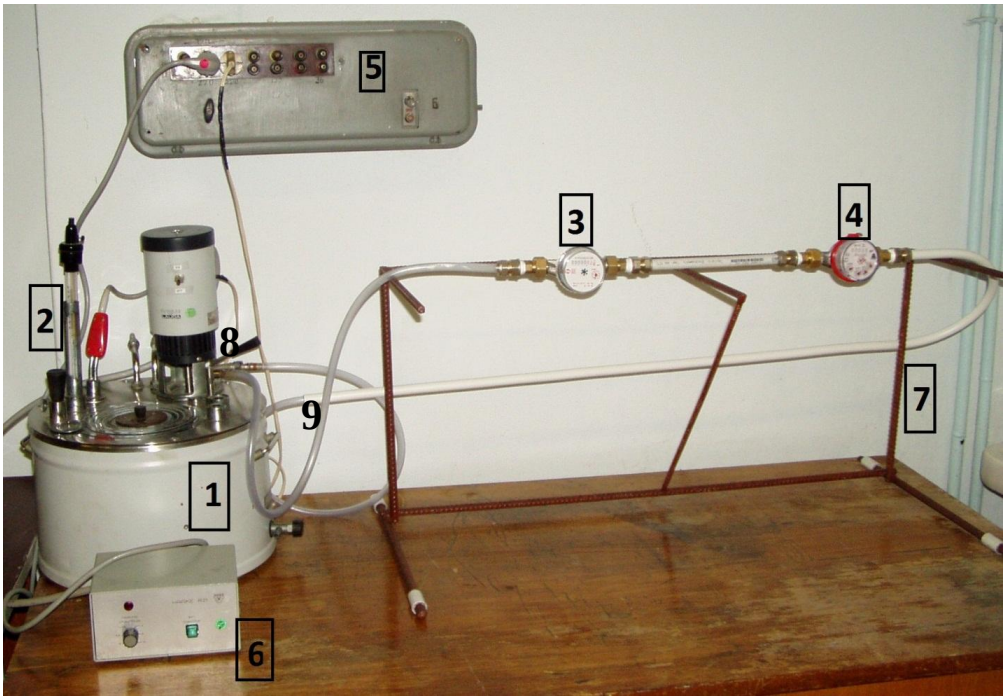



**Fig.8.2 Instalația experimentală**

## Mersul lucrării

1. Studiați cu atenție şi notați inscripțiile de pe fiecare contor. Menționăm, că pe placa unui contor trebuie să fie indicate:

a) clasa contorului;

b) marca comercială a producătorului sau a firmei comerciale;

c) numărul şi anul fabricării contorului;

d) debitul nominal: $Q_n$ ... $m^3/h$;

e) presiunea nominală: $P_n$ ... bar;

f) temperatura maximală a lichidului... °C;

g) poziția de montare a contorului H- orizontală; V-verticală.

2. Notați indicațiile inițiale ale contoarelor *3* $n_{10}$, $m^3$ şi *4* $n_{20}$, $m^3$, apoi plasați reglatorul de debit 9 în poziţie minimală, concomitent conectați pompa *8* şi cronometrul pentru 2 minute la debitul minimal determinând indicaţiile contoarelor *3* $n_1$, $m^3$ şi *4* $n_2$, $m^3$. Determinați valorile volumului apei $V_{ca}$ indicate

de mijlocul de măsură etalon şi $V_i$ - volumul indicat de contorul testat. Introduceți datele în tabelul 8.2.

**Tabelul 8.2**

| $n_{10}$, $m^3$ | $n_1$, $m^3$ | $V_{ca}=(n_1-n_{10})$,$m^3$ | $n_{20}$, $m^3$ | $n_2$, $m^3$ | $V_i=(n_2-n_{20})$,$m^3$ | t,s | $Q_1$, $m^3/h$ | $Q_2$, $m^3/h$ | $Q_{med}$, $m^3/h$ | $\Delta V$, $m^3$ | δ% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | |

3. Determinați debitul de apă indicat de contorul etalon $Q_1$ şi debitul indicat de contorul testat $Q_2$ conform relației $Q= V/t$. Determinați valoarea medie a debitelor. Introduceți datele în tabelul 8.2.

4. Repetați experimentul pentru diferite debite ale apei, rotind reglatorul de debit *9*.

5. Calculați erorile relative δ% şi cele absolute $\Delta V$, $m^3$ conform formulelor:

$$\delta = \left(\frac{V_i - V_{ca}}{V_{ca}} - \Delta\right) \cdot 100\%,$$

$$\Delta V = V_i - V_{ca}$$

unde $V_i$ este volumul indicat de contorul testat.

*6.* Construiți graficele dependenței erorilor absolute şi relative de debitul mediu la temperatura constantă a apei (citiți temperatura indicată de termometru *2*). Faceți analiza lor. Determinați *pragul de sensibilitate şi debitul tranzitoriu.*

*7.* Conectați termostatul *1* de la blocul de comandă *6* şi încălziți apa până la temperatura indicată, reglatorul de debit 9 rămâne în poziție neschimbată, adică debitul este constant (spre ex. în poziția ce corespunde debitului maxim).

*8.* Notați indicațiile inițiale ale contoarelor *3* $n_{10}$, $m^3$ şi *4* $n_{20}$, $m^3$, apoi concomitent conectați pompa *8* şi cronometrul pentru 2 minute, determinând indicațiile contoarelor *3* $n_1$, $m^3$ şi *4* $n_2$, $m^3$. Calculați valorile volumului apei $V_{ca}$

indicate de mijlocul de măsură etalon şi $V_i$ - volumul indicat de contorul testat la această temperatură. Introduceți datele în tabelul 8.3.

*9.* Determinați debitul de apă indicat de contorul etalon $Q_1$ şi debitul indicat de contorul testat $Q_2$ conform relaţiei $Q= V/t$. Determinați valoarea medie a debitelor. Introduceți datele în tabelul 8.3.

**Tabelul 8.3**

| $n_{10}$, $m^3$ | $n_1$, $m^3$ | $V_{ca}=(n_1-n_{10})$,$m^3$ | $n_{20}$, $m^3$ | $n_2$, $m^3$ | $V_i=(n_2-n_{20})$,$m^3$ | t,s | $Q_1$, $m^3/h$ | $Q_2$, $m^3/h$ | $Q_{med}$, $m^3/h$ | $\Delta V$, $m^3$ | δ% | t, °C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | |

10. Repetați experimentul pentru diferite temperaturi ale apei.

11. Calculați erorile relative δ% şi cele absolute $\Delta V$, $m^3$ conform formulelor:

$$\delta = \left(\frac{V_{i-}V_{ca}}{V_{ca}} - \Delta\right)\cdot 100\%,$$

$$\Delta V = V_i - V_{ca}$$

unde $V_i$ este volumul indicat de contorul testat, iar $\Delta = \beta(t_1 - t_2)$, unde $\beta$ este coeficientul dilatării volumetrice a lichidului, iar $t_1$ este temperatura lichidului în termostat, $t_2$ este temperatura lichidului nemijlocit în contorul verificat.

12. Construiţi graficele dependenței erorilor absolute şi relative de temperatura apei la un debit constant. Faceţi analiza lor.

**Întrebări pentru evaluarea cunoștințelor**

1. Descrieți principiul de funcționare a contoarelor de apă de viteză.
2. Definiți caracteristicele metrologice ale contoarelor de apă.
3. Descrieți instalația experimentală.
4. Explicați sensul inscripțiilor de pe fiecare contor.

5. Caracterizați clasificarea contoarelor de apă.
6. Care este cauza dependenței erorilor contoarelor de apă de debit şi temperatură?

**Lista bibliografică:**


1. Механика и молекулярная физика: *Физический практикум. Под редакцией Иверoновой В.И.* Москва: Наука, 1967, 352 стр.
2. Лабораторные занятия по физике. Под редакцией Гольдина Л.Л. Москва: Наука, 1983, 704 стр.
3. NML 3-08:2017, Contoare de apa. Procedura de verificare metrologică.

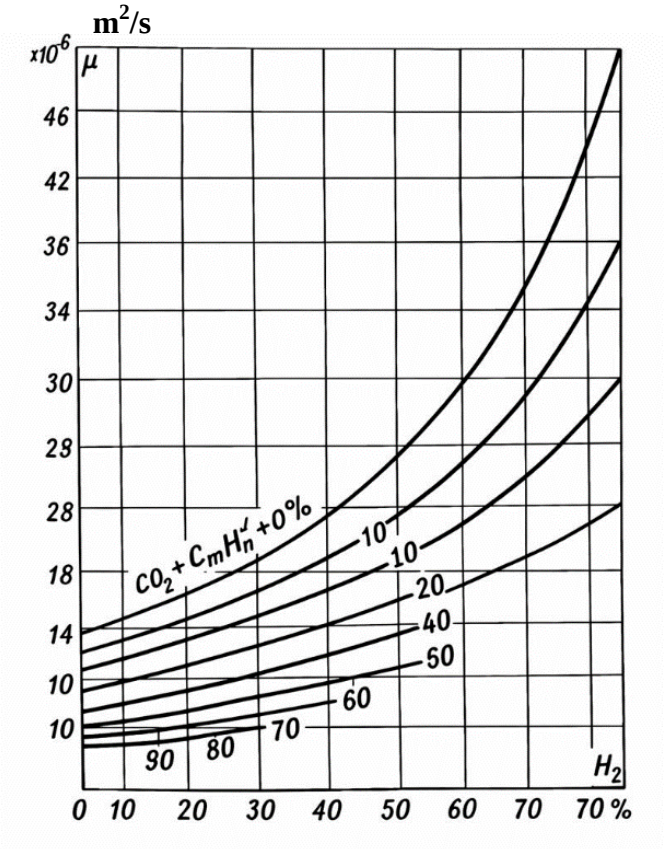
# Bibliografie


1. Монахов В.И. *Измерение расхода и количества жидкости, газа и пара*. Ленинград: Метрология, 1972, 314стр.
2. Кухлинг Х. *Справочник по физике*. Москва: Мир, 1982, 519стр.
3. Механика и молекулярная физика: *Физический практикум. Под редакцией Иверонової В.И.* Москва: Наука, 1967, 352стр.
4. Лабораторные занятия по физике. Под редакцией Гольдина Л.Л. Москва: Наука, 1983, 704стр.
5. NML 3-08:2017, Contoare de apa. Procedura de verificare metrologica.
6. NML 6-05:2017, Contoare de energie termică. Procedura de verificare metrologica.
7. NML 3-09:2017, Contoare de gaz cu membrană. Procedura de verificare metrologica.
8. NML 3-15:2021, Contoare de gaz cu debitul maxim până la 2500 $m^3$/h. Procedura de verificare metrologica.
9. NML 03-20:2024, Complexe de măsurare a cantităților de fluide, inclusiv cu dispozitive de strangulare. Procedura de verificare metrologica.

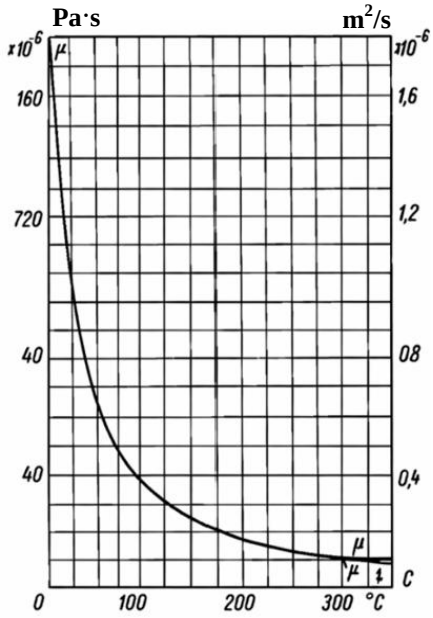
## Anexa 1. Unităţi de măsura a presiunii

| $Pa=N/m^2$ | $at=kgf/cm^2$ | atm | bar | mm col.Hg | mm col.apa=$kgf/m^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | $1.02\cdot10^{-5}$ | $9.87\cdot10^{-4}$ | $10^{-5}$ | $75\cdot10^{-4}$ | 0.102 |
| $9.81\cdot10^{4}$ | 1 | 0.968 | 0.981 | 736 | $10^{4}$ |
| $1.013\cdot10^{5}$ | 1.033 | 1 | 1.013 | 760 | $1.033\cdot10^{4}$ |
| $10^{5}$ | 1.02 | 0.987 | 1 | 750 | $1.02\cdot10^{4}$ |
| 133 | $1.36\cdot10^{-3}$ | $1.32\cdot10^{-3}$ | $1.33\cdot10^{-2}$ | 1 | 13.6 |
| 9.81 | $10^{-4}$ | $9.68\cdot10^{-5}$ | $9.81\cdot10^{-5}$ | $7.36\cdot10^{-2}$ | 1 |

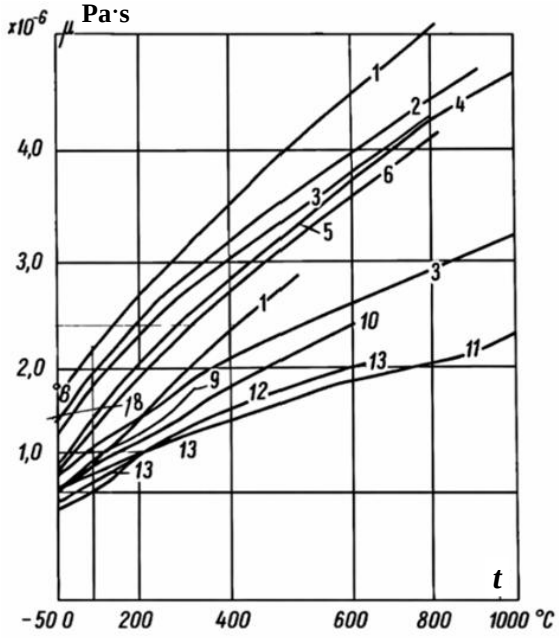
## Anexa 2. Vâscozitatea cinematică a amestecurilor de gaze în condiţii normale



## Anexa 3. Vâscozitatea medie dinamică şi cinematică a apei

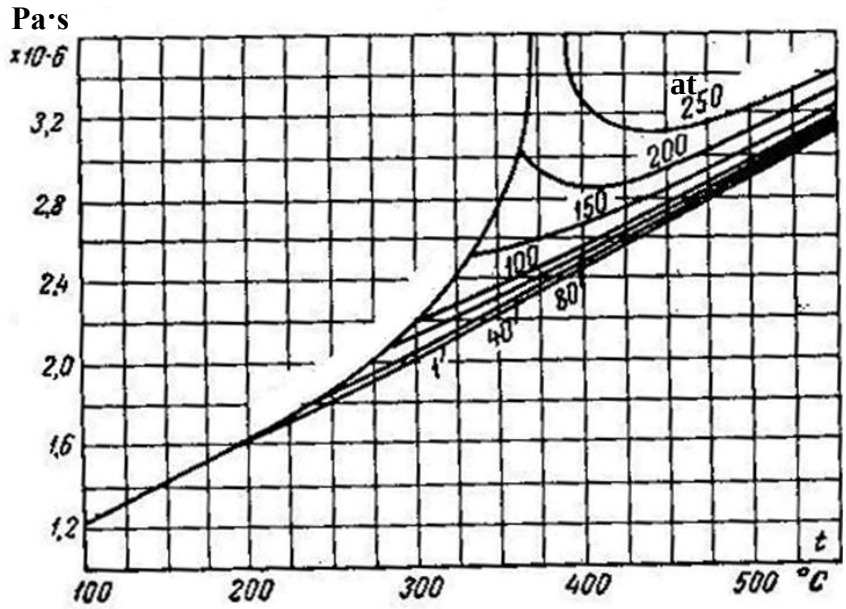



## Anexa 4. Vâscozitatea dinamică a unor gaze




**1-oxigen; 2-aer; 3-azot,oxid de carbon; 4-bioxid de carbon; 5-clor; 6-gaz sulfuros, hidrogen sulfurat;7-amoniac, etilenă; 8-metan; 9-acetilenă;10- etan; 11-hidrogen: 12- propan; 13- butan, izobutan**

## Anexa 5. Vâscozitatea dinamică a vaporilor de apă




## Anexa 6. Coeficienţii de comprimare pentru unele gaze

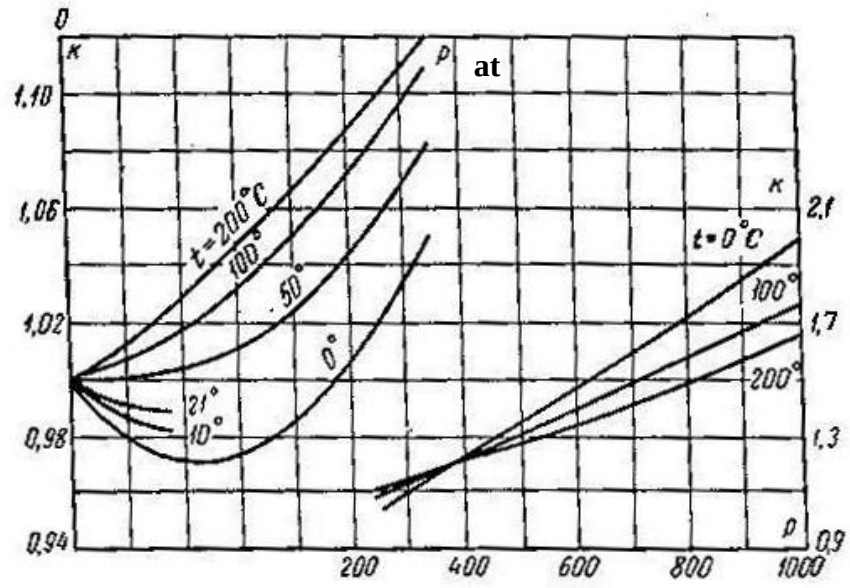



**Fig. 1A. Aer**

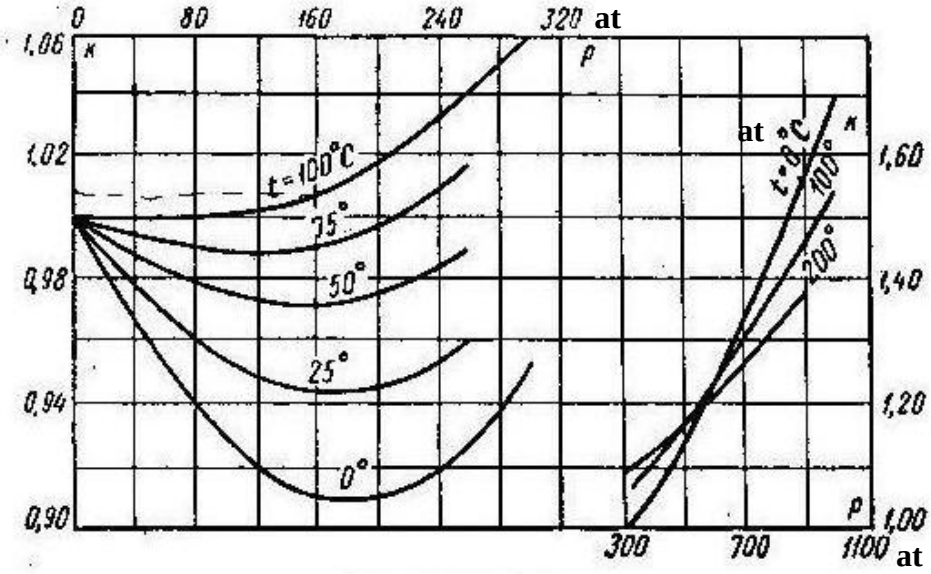



**Fig. 2A. Oxigen**

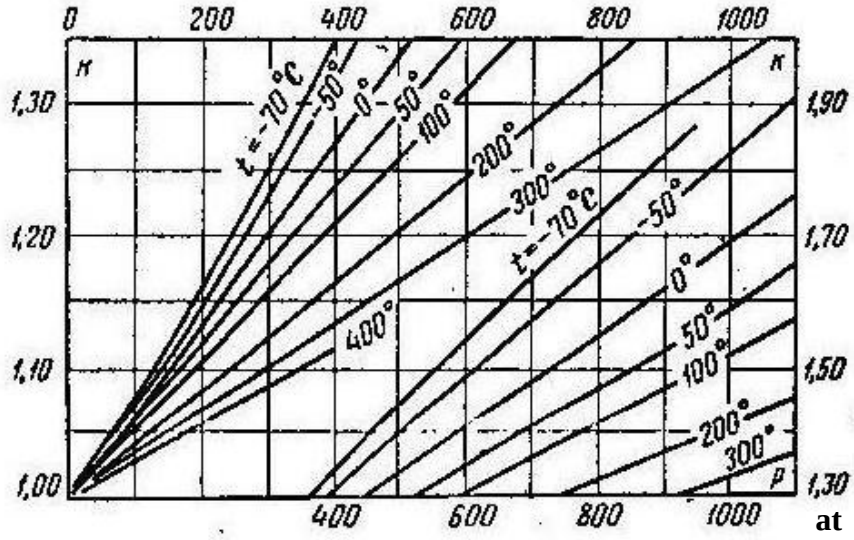



**Fig.3A. Hidrogen**

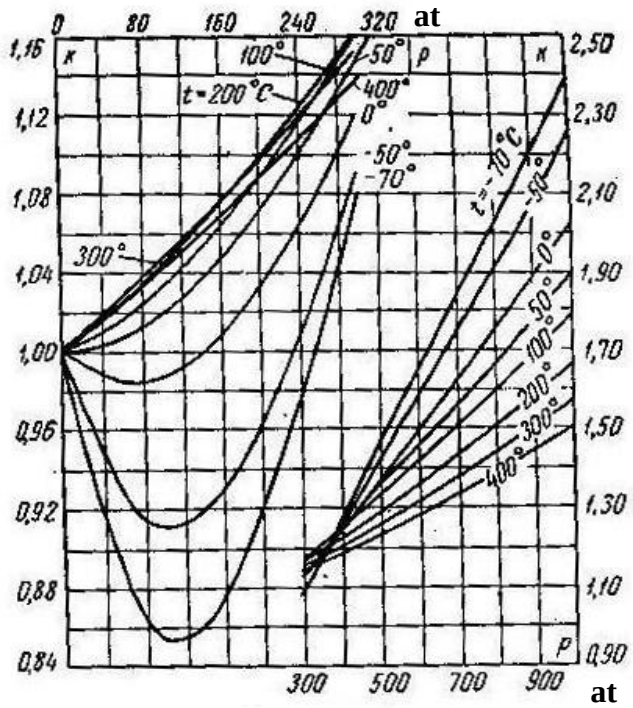



**Fig. 4A. Azot**

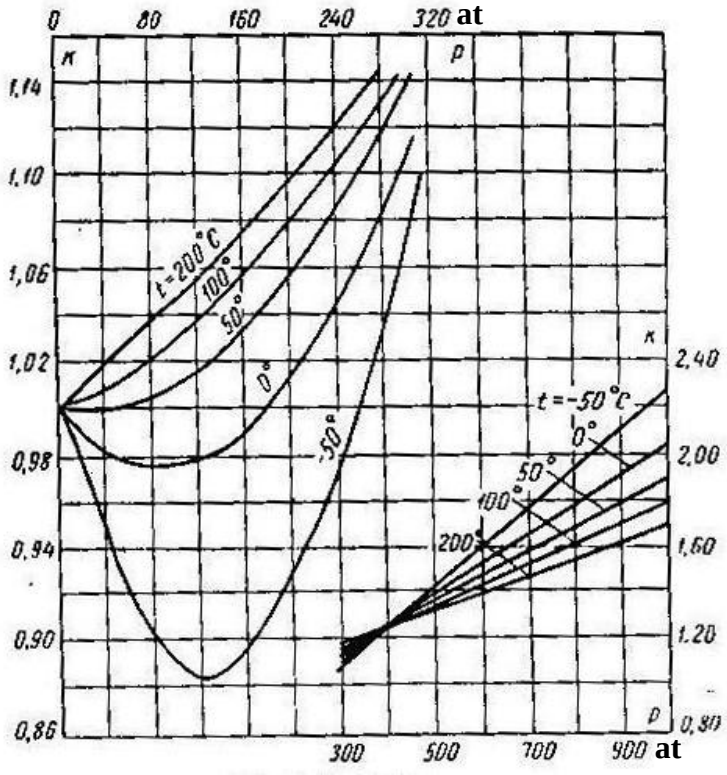



**Fig. 5A. Oxid de carbon**

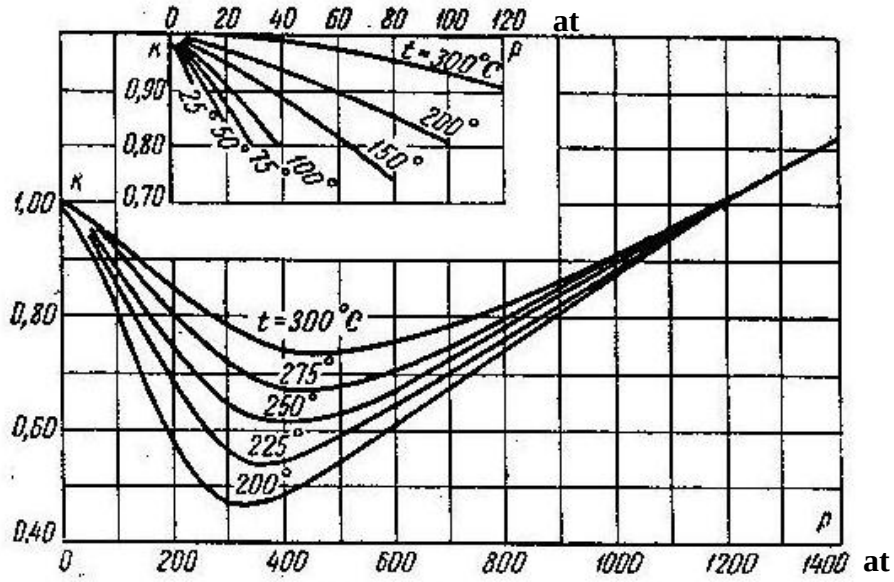



**Fig. 6A. Amoniac**

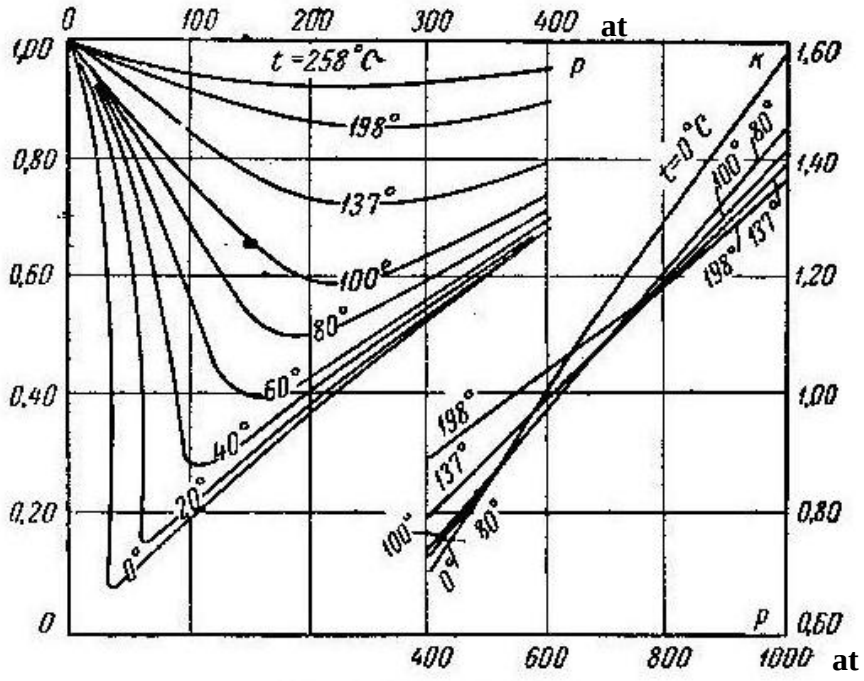



**Fig.7A. Bioxid de carbon**

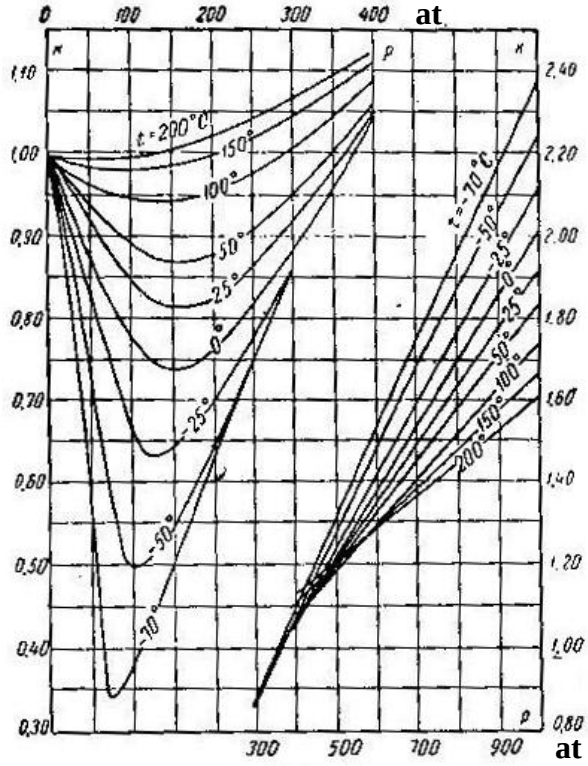



**Fig. 8A. Metan**

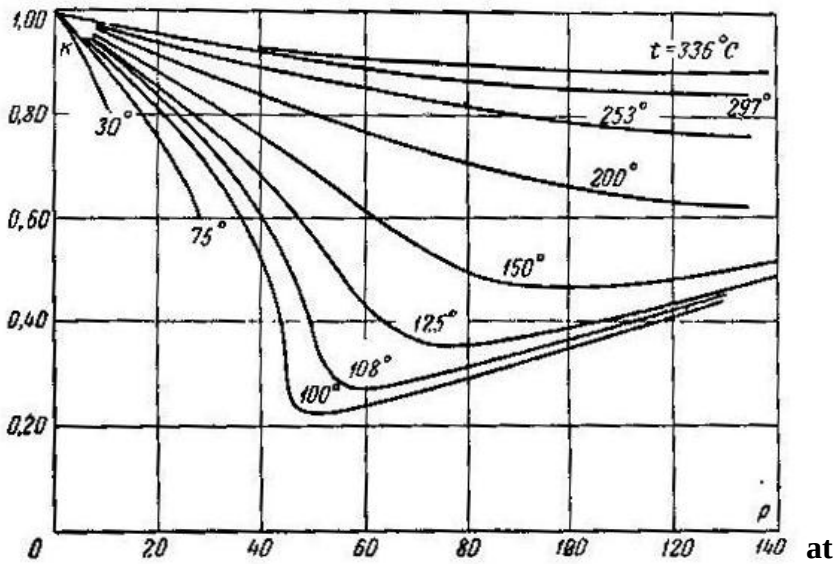



**Fig. 9A. Propan**

# Măsurări debit gaze şi lichide

# Îndrumar metodic pentru lucrările de laborator

---

Asistență computerizată – *Maria Bondari*

Bun de tipar 2026. Formatul 70x100 $^{1}/_{12}$.
Coli de tipar 9,6. Coli editoriale 3,4.
Comanda. Tirajul 20 ex.

Editura USM
Str. Al. Mateevici, 60, Chișinău, MD 2009
e-mail: *editurausm@gmail.com*