

1. MĂSURAREA PRESIUNILOR STATICE, DINAMICE ȘI TOTALE, A VITEZELOR ȘI DEBITELOR LA GAZE

1.1 BAZELE TEORETICE PRIVIND MĂSURAREA PRESIUNILOR STATICE, DINAMICE ȘI TOTALE

Măsurarea vitezei de curgere și a debitului fluidelor cu tuburi pneumometrice se reduce la măsurarea presiunii dinamice a curentului.

În cazul curgerii fluidelor, relația de bază este ecuația lui Bernoulli:

$$w \cdot \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

Pentru fluidele puțin compresibile sau în cazul când diferența de presiune este mică, se admite ca densitatea este constantă ($\rho = \text{ct}$).

În aceste condiții ecuația lui Bernoulli devine:

$$\frac{w}{2} + \frac{p}{\rho} + g \cdot z = \text{const.} \quad (2)$$

În cazul vaporilor și a gazelor se poate neglija energia de poziție "gz" și relația devine:

$$\frac{w^2}{2} + \frac{p}{\rho} = \text{const.} \quad (3)$$

sau

$$\rho \frac{w^2}{2} + p = \text{const.} \quad (3a)$$

în care: w - este viteza de curgere a fluidului, în m/s;

$\rho w^2/2 = p_d$ - este presiunea dinamică în N/m²;

$p = p_{st}$ - este presiunea statică în N/m².

Suma acestor două presiuni, dinamică și statică dă presiunea totală:

$$p_d + p_{st} = p_{tot} \quad (4)$$

Relația (4) exprimă faptul că într-o curgere a vaporilor sau gazelor fără frecare, presiunea totală este aceeași în toate secțiunile, sau într-o destindere de la p_1 la p_2 presiunea statică scade, iar presiunea dinamică p_d crește, astfel încât presiunea totală p_{tot} este constantă.

Scopul lucrării de laborator este determinarea presiunilor, vitezei și debitului de aer ce trece printr-o conductă de sece circulară, precum și pierderile de presiune longitudinală și locală.

1.2 INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Figura 1

Instalația de față conține un ventilator care aspiră aerul din atmosferă și-l refulează în conductă (fig. 1)

Pe traseul conductei de oțel sunt montate o serie de aparate care servesc la determinarea mărimilor necesare.

Pentru variația debitului de aer pe conductă s-a prevăzut clapeta „a”, iar pe ramificație clapeta „b”.

În continuare există o priză a presiunii statice „c”, cu inel egalizator de presiune unde se măsoară $p_{st,c}$, priza „d” la care se măsoară presiunea dinamică $p_{d,d}$, priza „e” la presiunea totală $p_{tot,e}$ și priza „f” la care se măsoară toate presiunile din această secțiune:

$$p_{d,f}, p_{st,f}, p_{tot,f}$$

Pentru măsurarea pierderilor de presiune longitudinală și locală s-au prevăzut prizele „g” „h” și „t”, la care se măsoară presiunile statice.

1.3 3. EFECTUAREA LUCRĂRII

1.3.1 Măsurarea presiunii statice

În cadrul lucrării, măsurarea singulară a presiunii statice se face la peretele conductei. Pentru aceasta este necesar să existe un orificiu de 0,5 - 2 mm perpendicular pe peretele inferior al conductei (fig. 2).

Figura 2

Dacă se notează cu p_0 presiunea barometrică și cu Δp_{st} denivelarea produsă în manometrul diferențial cu lichid (apă), relația de calcul a presiunii statice este:

$$p = p_0 + \rho_{(H_2O)} \cdot g \cdot \Delta h_{st} \quad [N/m^2] \quad (5)$$

presiunea barometrică p_0 se măsoară cu barometrul cu mercur. Densitatea apei ρ_{H_2O} se ia la temperatura coloanei de apă din manometrul diferențial.

Datele se introduc în tabelul nr. 1.

1.3.2 Măsurarea presiunii dinamice

Aparatul cu care se măsoară presiunea dinamică este tubul Prandtl (fig. 3)

Tubul interior al acestui aparat transmite presiunea totală, iar tubul exterior, presiunea statică prin fanta laterală.

Tubul Prandtl e pus în legătură cu un manometru diferențial la care se citește presiunea dinamică sub forma coloanei Δh_d .

Tubul trebuie așezat exact în direcția curgerii fluidului în sens opus curentului.

Figura 3

Cunoscându-se denivelarea coloanei de lichid Δh_d din momentul diferențial, se determină presiunea dinamică cu relația:

$$p_d = \rho_{(H_2O)} \cdot g \cdot \Delta h_d = \frac{w^2}{2} \rho_{T,p} \quad [N/m^2] \quad (6)$$

unde, $\rho_{T,p}$ - este densitatea aerului la temperatura t a aerului și la presiunea p_{st} a aerului din conductă

$$\rho_{T,p} = \rho_{0,aer} \cdot \frac{p_{st}}{p_0} \cdot \frac{273}{T}; \text{ unde } \rho_{0,aer} \text{ este luat și la presiunea } p_{st} \text{ a aerului din conductă:}$$

$$p_0 = 101325 \text{ N/m și } T = t + 273 \text{ K.}$$

Apoi pe baza relației (6) se poate calcula viteza curentului de fluid, într-un anumit punct al secțiunii:

$$w_{max} = \sqrt{2 \cdot \frac{\rho_{(H_2O)}}{\rho_{T,p}} \cdot g \cdot \Delta h_d} = \sqrt{2 \cdot \frac{p_d}{\rho_{T,p}}}$$

w_{max} se află în centrul conductei. Datele se trec în tabelul 2.

1.3.3 3.3.Măsurarea presiunii totale

presiunea totală a fluidului se poate măsura cu ajutorul tubului Prandtl, sau cu o singură sondă pneumometrică montată în sens opus curentului.

Punând în comunicație tubul Prandtl sau sonda pneumometrică cu un manometru diferențial, se citește denivelarea h_{tot} și cu aceasta se obține presiunea totală după relația:

$$p_{tot} = p_0 + \rho_{(H_2O)} \cdot g \cdot \Delta h_{tot} \quad N/m^2 \quad (7)$$

datele se trec în tabelul 3.

1.3.4 Măsurarea combinată a presiunilor

Figura 4

Viteza medie v_m a curentului de fluid într-o secțiune este dată de relația:

$$v_m = \frac{1}{A} \int_A w dA$$

În acest scop se folosește aparatul universal de măsurare a presiunilor, tubul Prandtl. Montajul necesar pentru măsurarea presiunilor statică, dinamică și totală este arătată în figura 4.

$$p_{st} = p_0 + \rho_{(H_2O)} \cdot g \cdot \Delta h_{st}$$

$$p_d = p_0 + \rho_{(H_2O)} \cdot g \cdot \Delta h_{st} = \rho \frac{w^2}{2}$$

$$p_{tot} = p_0 + \rho_{(H_2O)} \cdot g \cdot \Delta h_{tot}$$

1.4 4. BAZELE TEORETICE PRIVIND MĂSURAREA VITEZEI MEDII ȘI A DEBITULUI DE FLUID

Viteza de curgere a unui fluid este diferită de la un punct la altul al secțiunii conductei.

Într-o secțiune a unei conducte circulare, în cazul curgerii laminare a fluidului, distribuția vitezei este asemănătoare unui paraboloid foarte turtit (fig. 5)

Figura 5

în care A este aria secțiunii normale a conductei, iar w este viteza fluxului corespunzătoare unui element de suprafață dA .

Pentru determinarea experimentală a vitezei medii se pot folosi mai multe metode.

1.4.1 CONDUCTE CIRCULARE

1.4.1.1 Metoda nr. 1

Măsurându-se viteza în diferite puncte pe un diametru a unei secțiuni (fig. 5) se poate trasa curba de variație a vitezei cu distanța r la axa conductei: $w = f(r)$

Figura 6

Pentru conducte circulare dA poate fi considerat ca un element de forma unei coloane circulare (fig. 6b) la lățime dr , la raza r și în aceste condiții neglijând infiniții mici de ordin superior se obține:

$$dA = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr$$

care înlocuită în relația (8) și ținând cont că aria secțiunii $A = \pi R^2$ duce la:

$$w_m = \frac{1}{A} \int_A w dA = \frac{2}{R^2} \int_0^R r w dr,$$

prin rezolvarea integralei (9) se face produsul ordonatei curbei $w = f(r)$, cunoscută experimental, cu raza în fiecare punct, obținându-se produsele:

$$r_1 w_1; r_2 w_2; r_3 w_3; \dots \text{etc.}$$

Cu ajutorul acestor produse se poate trasa curba rw , pentru care $(rw)dr$ este un element de suprafață de sub această curbă.

Integrala (9) de la $r = 0$ la $r = R$ este aria de sub curba rw . Planimetrându-se aria (065) și ținând cont de scara la care a fost reprezentată curba se poate determina viteza medie cu relația:

$$w_m = \frac{2}{R^2} \text{ aria (065)} \quad (10)$$

Pentru a trasa curba de variație $w = f(r)$, pentru conducte circulare, secțiunea se împarte într-un număr par „n” de suprafețe concentrice și egale, delimitate prin cercuri de raze $r_2, r_4, r_6 \dots$ etc (fig. 7).

Figura 7

Pentru măsurarea vitezei în sectorul AB trebuie să se aleagă un punct astfel încât cercul de rază r_3 dus prin acel punct, să împartă sectorul AB în două părți de suprafețe egale. Viteza medie în acest sector se obține din patru măsurători în puncte situate pe acest cerc de rază r_3 , la extremitățile a două diametre perpendiculare (1, 2, 3, 4). Deci secțiunea conductei se împarte de fapt în $2n$ părți prin cercurile de rază r_1, r_2, r_3, r_4 , iar vitezele se măsoară în $4n$ puncte aflate pe cercurile cu razele $r_1, r_3, \dots, r_{2n-1}$.

Formulele care dau valorile razelor cercurilor pe care trebuie măsurate vitezele cu tubul pneumometric, în puncte sunt următoarele:

$$\begin{aligned} r_1 &= R \sqrt{\frac{1}{2n}}; \\ r_3 &= R \sqrt{\frac{3}{2n}}; \\ r_5 &= R \sqrt{\frac{51}{2n}}; \\ r_{2n-1} &= R \sqrt{\frac{2n-1}{2n}}. \end{aligned}$$

unde R este raza interioară a conductei.

La conductele cu diametrul între 300 mm se recomandă să se ia $n = 3$, iar la cele cu diametrul între 300 și 900 mm, „n” trebuie să fie egal cu cel puțin 5.

1.4.1.2 Metoda 2

Un alt procedeu care permite însă determinarea aproximativă a vitezei medii în conductele cu secțiune turbulentă și cu profil simetric al vitezelor, constă în măsurarea directă a presiunii dinamice cu tubul pneumometric, montat pe un diametru la distanța $0,24 R$ pe peretele interior a conductei. În acest punct viteza locală a fluidului este egală aproximativ cu valoarea medie.

1.4.1.3 Metoda 3

Procedeu cel mai simplu pentru determinarea vitezei medii w_m , în conductele cu secțiune circulară se bazează pe faptul ca:

$$\frac{w_m}{w_{max}} = f(Re_D)$$

unde: w_{max} - este viteza fluidului în axa conductei (max); Re_D - este criteriul Reynolds, raportat la diametrul interior al conductei și la viteza maximă w_{max} :

$$Re_D = \frac{w_{max} \cdot D}{\nu_{T.P}}$$

Figura 8

În figura 8 este reprezentată curba de variație a raportului v_m/v_{max} în funcție de Re_D construită după datele lui Nicuradze. Determinându-se presiunea dinamică în axa conductei se poate calcula criteriul Reynolds, Re_D , și cu această valoare se poate determina valoarea raportului v_m/v_{max} cu diagrama din fig. 8 și deci, valoarea vitezei medii. Secțiunea în care se măsoară viteza maximă trebuie să se afle la o distanță de cel puțin 40...50 de diametre de la intrarea în conductă.

Datele se trec în tabelul 2.

1.4.2 CONDUCTE CU SECȚIUNI OARECARE

Pentru măsurarea vitezei curentului în conductă cu secțiune necirculară, se împarte secțiunea în „n” dreptunghiuri sau pătrate de suprafețe egale și se măsoară presiunea dinamică în punctul în care se întâlnesc diagonalele dreptunghiurilor sau pătratelor. De exemplu, în fig. 9 este reprezentată schema de măsurare a vitezelor într-o secțiune dreptunghiulară.

Figura 9

- 1- conductă;
- 2- dispozitiv de fixare a tubului.

Secțiunea s-a împărțit în dreptunghiuri de laturi „s” și „b”. Notând cu w_1, w_2, \dots, w_n vitezele din fiecare sector, cu h_1, h_2, \dots, h_n , denivelările la momentul diferențial, cu Q_m debitul și cu A aria secțiunii conductei se obține:

$$Q_m = w_1 \frac{A}{n} + w_2 \frac{A}{n} + \dots + w_n \frac{A}{n} \quad (11)$$

$$Q_m = \frac{A}{n} (w_1 + w_2 + \dots + w_n) \quad (12)$$

scrie:

$$Q_m = \rho_A \cdot w_m \quad (13)$$

de unde, prin comprimare cu relația (11) rezultă:

$$w_m = \frac{1}{n} (w_1 + w_2 + \dots + w_n) \quad (14)$$

Introducând în relația (13) valorile w_1, w_2, \dots, w_n calculate conform relației (6), însă ținând cont și de influența coloanei de lichid din momentul diferențial se obține:

$$w_m = \sqrt{2g \frac{\rho_{(H_2O)}}{\rho} - 1} \cdot \frac{1}{n} (\sqrt{\Delta h_1} + \sqrt{\Delta h_2} + \dots + \sqrt{\Delta h_n})$$

sau

$$w_m = \sqrt{2g \Delta h_m \left(\frac{\rho_{(H_2O)}}{\rho} \right) - 1} \quad (15)$$

în care:

$$\sqrt{\Delta h_m} = \frac{1}{n} (\sqrt{\Delta h_1} + \sqrt{\Delta h_2} + \dots + \sqrt{\Delta h_n}) \quad (16)$$

Numărul „n” de drept unghiuri sau pătrate egale în care se împarte o secțiunea oarecare pentru determinarea vitezei medii depinde de suprafața conductei.

Pentru conductele cu suprafața secțiunii până la 0,35 m² trebuie să se ia cel puțin 16 sectoare, iar la secțiunile cu suprafețe mai mari, numărul de sectoare trebuie alese în așa fel ca fiecare sector să nu depășească suprafața de 0,032 m².

1.5 DETERMINAREA DEBITULUI

Cunoscându-se viteza medie w_m , debitul se determină cu relația:

$$\dot{V}_{T,p} = w_m \cdot A \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

pentru că debitul volumic depinde de T și p_{st} ale fluidului se calculează debitul volumic normal la 0° C și 760 mmHg.

$$\dot{V}_{N,0^\circ\text{C},760\text{mmHg}} = \dot{V}_{T,p} \sqrt{\frac{\rho_{T,p}}{\rho_{0^\circ\text{C},760}}} \cdot \frac{T}{273} \cdot \frac{p_0}{p_{st}} \quad [\text{m}^3\text{N/s}] \quad (17)$$

debitul masic se poate calcula astfel:

$$\dot{m} = \rho_{0^\circ\text{C},760} \cdot \dot{V}_{0^\circ\text{C},760}; \quad [\text{kg/s}] \quad (18)$$

$$\dot{m} = \rho_{T,p} \cdot w_m \cdot A \quad [\text{kg/s}] \quad (19)$$

$$\dot{m} = \rho_{T,p} \cdot A \cdot \sqrt{2g\Delta h_m \left(\frac{\rho_{(\text{H}_2\text{O})}}{\rho} - 1 \right)} \quad [\text{kg/s}] \quad (20)$$

în care:

$\rho_{T,p}$ - este densitatea fluidului din conductă la temperatura T și presiunea p;

A - este aria secțiunii conductei;

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ - accelerația gravitațională;

Δh_m - este denivelarea coloanei de lichid (apă) din manometrul diferențial în (m).

1.6 MĂSURAREA PIERDERILOR DE PRESIUNE ÎN LUNGUL CONDUCTEI

Pentru a calcula pierderile de presiune, pe lungimea conductei există montate două prize „c” și „g” pentru presiunea statică, (fig. 1). Din curgerea fluidului în conducte se cunoaște că pierderea de presiune longitudinală se determină cu relația:

$$\Delta p_f = \lambda \frac{l}{D} \rho_{T,p} \cdot \frac{w_m^2}{2} \quad (21)$$

în care:

λ - este coeficientul de rezistență la frecarea de conductă;

l - lungimea conductei în m;

w_m - viteza medie a fluidului în m/s;

$\rho_{T,p}$ - densitatea fluidului în kg/m³.

1.7 DETERMINAREA PIERDERILOR LOCALE DE PRESIUNE

Datorită variației direcției vânei de fluid din coturile instalației, are loc o pierdere de energie a fluidului. Din această cauză presiunea va scădea cu valoarea:

$$\Delta p_l = \xi \cdot \rho_{T,p} \cdot \frac{w_m^2}{2} \quad (22)$$

unde ξ este coeficientul de rezistență locală.

Mărimile măsurate se trec în tabelul 5.

1.8 BULETIN DE MĂSURĂTORI

- măsurătorile s-au efectuat pentru regimul maxim.

a) Determinarea presiunii statice

Tabel nr. 1

Nr. crt.	p_0 [N/m ²]	$\rho_{(H_2O)}$ La temperatura coloanei de lichid [kg/m ³]	Δh_{st} [m]	$p_{st} = p_0 + \rho_{(H_2O)} \cdot g \cdot \Delta h_{st}$ [N/m ²]
0	1	2	3	4
1	10 ⁵	(1000)	0,144	104312,0

b) Determinarea presiunii dinamice, a vitezei medii, debitului volumic și masei

Tabel nr. 2

Nr. crt	Δh_d [m]	$\rho_{(H_2O)}$ [kg/m ³]	$\rho_{0,aer}$ kg/m ³	t [°C]	T [K]	p_{st} [N/m ²]	$\rho_{T,p}$ [kg/m ³]	$p_d = \rho_{(H_2O)} \cdot g \cdot \Delta h_d$ [N/m ²]	$w_{max} = \sqrt{2 \frac{p_d}{\rho_{T,p}}}$ [m/s]
0	1	2	3	4	5	6	6	7	8
1	0,008	(1000)	1,293	18	291	104312,	1,23	78,84	11,32

Tabel nr. 2

D [m]	$v_{T,p,aer}$ [m ² /s]	Re _D	$\frac{w_{med}}{w_{max}}$	w_{med} m/s	$A = \frac{\pi D^2}{4}$ m ²	$\dot{V}_{T,p}$ m ³ /s	$\dot{V}_{0^{\circ}760mmHg}$ m ³ /s	$\dot{m} = \rho_{T,p} \cdot w_{med} \cdot A$ kg/s
9	10	11	12	13	14	15	16	17
0,08	0,0000155	58425,8	0,83	9,39	5,026 · 10 ⁻³	0,047	0,048	0,058

b) Determinarea presiunii totale

Tabel nr. 3

Nr. Crt.	p_0 [N/m ²]	$\rho_{(H_2O)}$ [kg/m ³]	Δh_{tot} [m]	$p_{tot} = p_0 + \rho_{(H_2O)} \cdot \Delta h_{tot}$ [N/m ²]
0	1	2	3	4
1	10 ⁵	1000	0,152	101491

c) Determinarea pierderilor de presiune în lungul conductei

Tabel nr. 4

Nr. crt	Δp_f [N/m ²]	D [m]	$\rho_{T,p}$ [kg/m ³]	w_m [m/s]	$\lambda = \Delta p_f \cdot \frac{2D}{\rho_{T,p} \cdot w_m^2 \cdot l}$
0	1	2	3	4	5
1	39,2	0,08	1,23	9,37	0,21

d) DETERMINAREA COEFICIENTULUI DE REZISTENȚĂ LOCALĂ

Tabel nr. 5

Nr. crt	Δp_1 [N/m ²]	$\rho_{T,p}$ [kg/m ³]	w_m [m/s]	$\xi = \frac{2\Delta p_1}{\rho_{T,p} \cdot w_m^2}$
---------	-------------------------------------	--------------------------------------	----------------	--

0	1	3	4	5
1	239,2	1,23	9,37	0,54

1.9 CALCULUL ȘI DETERMINAREA DIAFRAGMELOR AJUTAJELOR ȘI A TUBURILOR VENTURI

Pentru determinarea debitului se notează cu indicele (1) parametrii geometrici ai dispozitivului și cei ai fluidului, înainte de diafragmă, cu (0) în dreptul orificiului diafragmei, cu (2) după diafragmă, în dreptul contracției maxime. Pe baza ecuației lui Bernoulli, pentru fluide incompresibile (cu densitatea constantă), cum pot fi considerate și gazele dacă diferența de presiune este mică rezultă:

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} (w_2^2 - w_1^2) \quad , \quad (a)$$

iar ecuația de continuitate devine:

$$A_1 w_1 = A_2 w_2, \quad (b)$$

Secțiunea A_2 din dreptul contracției maxime nu este egală cu secțiunea A_0 , din dreptul orificiului diafragmei, putând scrie raportul subunitar numit coeficient de contracție al vânei de fluid.