

5 Determinarea debitelor prin metoda ștrangulării

Lucrarea de laborator prezintă modul în care se realizează măsurătorile pentru determinarea debitelor cu ajutorul diafragmei, care este un dispozitiv de măsurare a debitului din conducte, bazat pe principiul ștrangulării secțiunii de curgere.

Scopul lucrării este însușirea noțiunilor fundamentale cu privire la debit și a algoritmului de calcul pentru determinarea debitelor prin metoda ștrangulării.

5.1 Noțiuni teoretice

Debitul unui fluid reprezintă mărimea fizică numeric egală cu cantitatea de fluid ce trece în unitatea de timp prin unitatea de suprafață, fiind una din principalele mărimi caracteristice ale fluidelor aflate în mișcare [31]. În tabelul 5.1 sunt prezentate tipurile de debit ce pot fi întâlnite în tehnică, definiția, simbolul și unitățile de măsură în SI.

Tabel 5.1 Tipuri de debit

Tipul de debit	Definiția	Simbol	UM în SI
Debitul volumic (debit de volum)	volumul de fluid ce trece printr-o secțiune în unitatea de timp	\dot{V}	[m ³ /s]
Debitul masic (debit de masă)	masa de fluid ce trece printr-o secțiune în unitatea de timp	\dot{m}	[kg/s]
Debitul gravimetric (debit de greutate)	greutatea fluidului care trece printr-o secțiune în unitatea de timp	\dot{g}	[N/s]

Debitul masic este dat de relația:

$$\dot{m} = \rho \cdot A_c \cdot w \quad [\text{kg/s}] \quad (5.1)$$

unde: ρ [kg/m³] este densitatea fluidului, A_c [m²] – aria secțiunii conductei, w [m/s] – viteza de deplasare a fluidului.

Relațiile care se stabilesc între debitul volumic și cel masic sunt:

$$\dot{V} = \dot{m} / \rho \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (5.2)$$

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} \quad [\text{kg/s}] \quad (5.3)$$

Măsurarea debitului este legată de principiul conservării masei, care arată că o masă statică care intră într-un sistem în unitatea de timp este egală cu masa care iese din sistem în aceeași unitate de timp [33]. Determinarea debitului pe baza principiului fizic de variație a presiunii fluidului prin ștrangulări intercalate în conducte se poate realiza utilizând diafragme, ajutaje și tuburi Venturi. Această metodă este adecvată pentru măsurarea debitelor de aer, de gaz metan sau abur. Metoda ștrangulării fluidului constă în măsurarea diferenței de presiune între secțiunea din amonte și cea din aval de ștrangulare a curentului de fluid, care depinde de viteza de deplasare a fluidului și deci de debit [34]. Diafragmele (Fig. 5.1) constituie unul dintre cele mai simple dispozitive de ștrangulare care se montează pe conducte cu scopul de a crea o îngustare locală (Fig. 5.2). Diafragmele sunt piese care au forma unui disc cu grosime mică, în care este practicat o deschidere circulară și care se fixează cu ajutorul unor flanșe [35]. Această îngustare produce o cădere de presiune pe diafragmă.



Fig. 5.1 Diafragmă

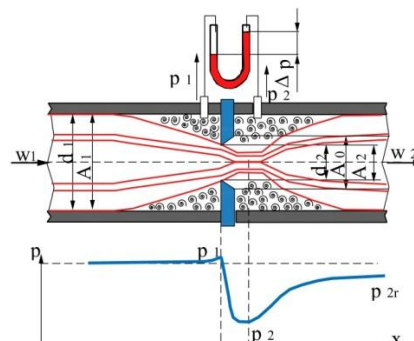


Fig. 5.2 Curgerea prin diafragmă

Diferența de presiune dintre amonte și avalul ștrangulării se măsoară cu un manometru diferențial, permițând astfel determinarea debitului volumic al fluidului [36]. Deoarece debitul de fluid este același prin toate secțiunile prin care trece, piesa de ștrangulare obligă fluidul să își crească viteza prin secțiunea de diametru redus [35], ceea ce înseamnă că va crește presiunea dinamică a fluidului după ștrangulare, în timp ce presiunea statică a fluidului va fi mai mare înainte de ștrangulare. Presiunea totală este constantă pentru debitul de fluid considerat pe parcursul unei măsurători.

Debitul masic al unui fluid incompresibil ce străbate o conductă se poate calcula cu relația [2]:

$$\dot{m} = \rho \cdot A_1 \cdot w_m \quad [\text{kg/s}] \quad (5.4)$$

când: ρ [kg/m^3] este densitatea fluidului incompresibil, A_1 [m^2] – aria secțiunii conductei, w_m [m/s] – viteza medie de deplasare a fluidului.

Masa fluidelor fiind aceeași în cele două secțiuni diferite ale conductei (în regim staționar), rezultă:

$$\rho \cdot A_1 \cdot w_1 = \rho \cdot A_2 \cdot w_2 \quad (5.5)$$

Ecuția lui Bernoulli în cele două secțiuni ale conductei este:

$$p_1 + \frac{\rho \cdot w_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho \cdot w_2^2}{2} \quad (5.6)$$

de unde rezultă că:

$$p_1 - p_2 = \rho \cdot \left(\frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2} \right) \quad (5.7)$$

Ținând seama că secțiunea A_2 din dreptul contracției maxime (Fig. 5.2), nu este egală cu secțiunea A_0 din dreptul orificiului diafragmei, atunci se poate scrie raportul subunitar numit coeficient de contracție a vânei de fluid:

$$\mu = \frac{A_2}{A_0} = \frac{A_2}{m \cdot A_1} = \frac{A_2}{\beta^2 \cdot A_1} \quad [-] \quad (5.8)$$

când coeficientul de ștrangulare este:

$$m = \beta^2 = \frac{A_0}{A_1} = \frac{d_0^2}{d_1^2} \quad [-] \quad (5.9)$$

Secțiunile de curgere fiind circulare, înseamnă că ariile acestora se pot calcula cu relațiile:

➤ pentru secțiunea conductei:

$$A_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \quad [\text{m}^2] \quad (5.10)$$

➤ pentru secțiunea orificiului diafragmei:

$$A_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \quad [\text{m}^2] \quad (5.11)$$

deci:

$$w_1 = \mu \cdot m \cdot w_2 = \mu \cdot \beta^2 \cdot w_2 \quad [\text{m/s}] \quad (5.12)$$

Înlocuind, se obține:

$$p_1 - p_2 = \rho \cdot \frac{w_2^2}{2} (1 - \mu^2 \cdot m^2) = \rho \cdot \frac{w_2^2}{2} (1 - \mu^2 \cdot \beta^4) \quad (5.13)$$

respectiv:

$$w_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - (\mu^2 \cdot m^2)}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_1 - p_2)} = \frac{1}{\sqrt{1 - (\mu^2 \cdot \beta^4)}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_1 - p_2)} \quad (5.14)$$

Relatia (5.14) exprimă valoarea vitezei în dreptul contracției maxime. Datorită viscozității fluidului și a frecării lui de pereții conductei și de diafragmă, apare o pierdere de viteză de care se ține seama prin coeficientul ξ . Deoarece μ și ξ nu sunt determinați în mod separat, se introduce în locul acestora coeficientul α_d , numit coeficient de debit, definit de expresia:

$$\alpha_d = \frac{\mu \cdot \xi}{\sqrt{1 - (\mu^2 \cdot m^2)}} = \frac{\mu \cdot \xi}{\sqrt{1 - (\mu^2 \cdot \beta^4)}} \quad [-] \quad (5.15)$$

În coeficientul de debit α_d se cuprind și influențele:

- ✓ vitezei fluxului de fluid dinaintea orificiului;
- ✓ neliniarității repartiției vitezelor de la ax la perete în secțiunea de măsurare;
- ✓ scăderii presiunii în unghiurile marginale înainte și după secțiunea de ștrangulare;
- ✓ rugozității;
- ✓ viscozității prin intermediul numărului Reynolds.

Astfel se consideră:

$$\alpha_0 = f(\text{Re}, m = \beta^2) \quad (5.16)$$

Numărul (criteriul de similitudine sau invariantul) Reynolds este definit de relația:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d_1}{\nu_{\text{aer}}^{t(^{\circ}\text{C})}} [-] \quad (5.17)$$

Viscozitatea cinematică a aerului la temperatura aerului din conductă $\nu_{\text{aer}}^{t(^{\circ}\text{C})}$ este dată în tabelul 5.2.

Tabel 5.2 Viscositatea cinematică a aerului

t_a [$^{\circ}\text{C}$]	$\nu_{\text{aer}}^{t_a(^{\circ}\text{C})}$ [m^2/s]	t_a [$^{\circ}\text{C}$]	$\nu_{\text{aer}}^{t_a(^{\circ}\text{C})}$ [m^2/s]
10	$14,16 \cdot 10^{-6}$	25	$15,53 \cdot 10^{-6}$
15	$14,61 \cdot 10^{-6}$	30	$16,00 \cdot 10^{-6}$
20	$15,06 \cdot 10^{-6}$	35	$16,48 \cdot 10^{-6}$

Viteza de deplasare a aerului în conductă:

$$w = \frac{\dot{V}}{A_1} [\text{m/s}] \quad (5.18)$$

Pentru diafragma cu prize de presiune la față, coeficientul de debit se calculează cu relația:

$$\alpha_d = \alpha_0 \cdot r_{\text{Re}} [-] \quad (5.19)$$

unde: α_0 este coeficientul de debit pentru conducte netede, a cărui valoare se obține din tabelul 5.3; iar r_{Re} - factor de corecție care ține seama de rugozitatea relativă a conductei, de β^4 și de numărul Reynolds Re din amonte de diafragmă.

Valoarea lui r_{Re} se calculează cu relația:

$$r_{\text{Re}} = (r_0 - 1) \cdot \left[1 - \frac{(\lg \text{Re} - 6)^2}{4} \right] + 1 [-] \quad (5.20)$$

cu următoarele excepții:

- ↪ dacă $\text{Re} \geq 10^6$, se va considera $r_{\text{Re}} = r_0$; valoarea lui r_0 se obține din tabelul 5.4, în care $k_r = 0,05\text{mm}$ și reprezintă rugozitatea medie a țevilor, iar d_1 este diametrul conductei [mm].
- ↪ dacă $\text{Re} \leq 10^4$, se va considera $r_{\text{Re}} = 1$.

Tabel 5.3 Coeficientul de debit α_0 pentru diafragme cu prize de presiune la față

β^4	Re		
	$1 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$
0,0600	0,6370	0,63100	0,62700
0,0625	0,6385	0,63225	0,62825
0,0650	0,6400	0,63350	0,62950

Tabel 5.4 Valorile coeficientului de rugozitate relativă pentru diafragme cu prize de presiune la față

β^2	d_1 / k_r								
	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200	3400
0,20	1,0030	1,0020	1,0010	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,25	1,0045	1,0030	1,0015	1,0005	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,30	1,0060	1,0040	1,0020	1,0010	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Densitatea aerului se calculează cu relația:

$$\rho = 1,293 \cdot \frac{p_{1abs}}{p_N} \cdot \frac{T_N}{t + T_N} \left[\text{kg/m}^3 \right] \quad (5.21)$$

unde: p_N este presiunea fizică normală, $p_N=101325\text{N/m}^2$; T_N – temperatura fizică normală, $T_N=273,15\text{K}$; $t[^\circ\text{C}]$ – temperatura aerului din conductă și $p_{1abs}[\text{N/m}^2]$ - presiunea absolută măsurată înainte de ștrangulare:

$$p_{1abs} = p_{1,st} + p_b \left[\text{N/m}^2 \right] \quad (5.22)$$

Relația de calcul pentru abaterea coeficientului de debit $\Delta\alpha$ este:

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha_d - \alpha_0}{\alpha_0} \cdot 100[\%] \quad (5.23)$$

Debitul volumic în dreptul contracției maxime se calculează cu relația:

$$\dot{V} = \alpha_d \cdot A_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_1 - p_2)} \left[\text{m}^3/\text{s} \right] \quad (5.24)$$

iar, debitul masic în dreptul contracției maxime:

$$\dot{m} = \rho \cdot A_2 \cdot w_2 = \alpha_d \cdot A_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (p_1 - p_2)} \left[\text{kg/s} \right] \quad (5.25)$$

Pentru fluidele compresibile este necesar să se țină seama de variația densității și de procesul de detentă care are loc după dispozitivul de ștrangulare. Coeficientul ϵ_e , numit coeficient de expansiune ține seama de această corecție și se obține din nomograma prezentată în figura 5.3 în funcție de exponentul adiabatic k al gazului, de tipul aparatului de ștrangulare și de raportul presiunilor absolute $\Delta p/p_{1abs}$, respectiv $(p_1-p_2)/p_{1abs}$. În cazul fluidelor încălzite are loc și o creștere a secțiunii A_0 a dispozitivului de măsură. De această variație a secțiunii de trecere se ține seama prin coeficientul de corecție k_t , în cadrul acestei lucrări $k_t = 1$.

Debitul volumic va fi:

$$\dot{V}_{real} = \epsilon_e \cdot k_t \cdot \alpha_d \cdot A_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \left[\text{m}^3/\text{s} \right] \quad (5.26)$$

respectiv debitul masic:

$$\dot{m}_{real} = \epsilon_e \cdot k_t \cdot \alpha_d \cdot A_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p} \left[\text{kg/s} \right] \quad (5.27)$$

unde: ϵ_e [-] este coeficient de expansiune; k_t [-] - coeficient de corectie pentru diafragme; α_d [-] - coeficient de debit; A_0 [m^2] – aria secțiunii orificiului diafragmei; ρ [kg/m^3] – densitatea fluidului incompresibil; iar Δp [N/m^2] – căderea de presiune pe diafragmă.

Prezenta lucrare se limitează numai la determinarea debitelor de aer prin metoda ștrangulării utilizând o diafragmă cu prize de presiune la față.

5.2 Descrierea instalației și desfășurarea lucrării

Standul experimental, prezentat în figura 5.4 pentru determinarea debitului de aer prin metoda ștrangulării este compus dintr-un compresor antrenat de motorul electric. Aerul refulat de compresor este stocat într-un rezervor tampon pentru atenuarea impulsurilor de presiune în vederea asigurării unui regim staționar de curgere prin conductă. Reglarea debitului de aer se realizează cu ajutorul robinetului de pe rezervorul tampon.

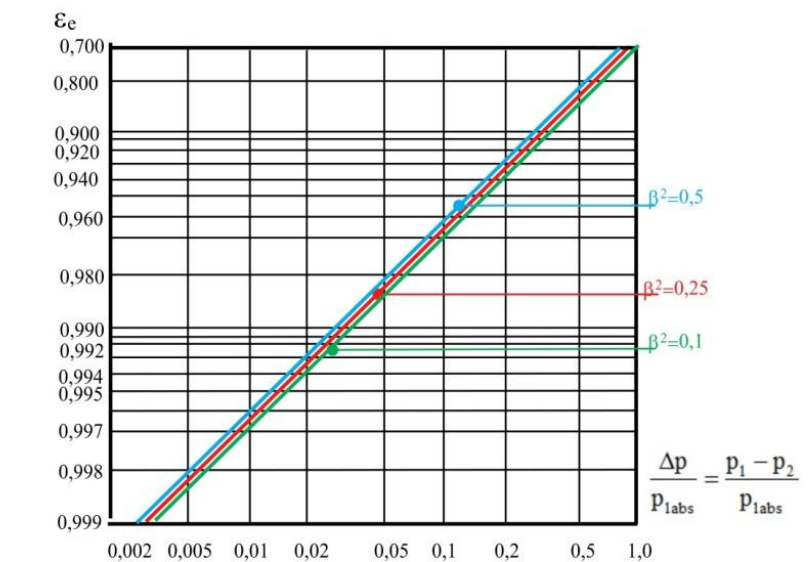


Fig. 5.3 Coeficientul de expansiune ϵ_e pentru diafragme utilizate în conducte prin care circulă aer cu coeficientul adiabatic $k=1,4$

Pe conducta circulară prin care circulă debitul de aer, este montată o diafragmă de bronz având dimensiunile $d_0=10$ mm, respectiv $d_1=20$ mm; un manometru diferențial pentru măsurarea căderii de presiune pe diafragmă (Δp), un manometru pentru măsurarea presiunii statice a aerului înainte de intrarea în diafragmă ($p_{1.st}$) și un termometru pentru măsurarea temperaturii aerului din conductă. După pornirea compresorului și atingerea unui regim staționar de curgere a aerului prin conductă (presiune constantă în rezervorul tampon) se trece la citirea indicațiilor aparatelor. Se citesc: temperatura aerului, presiunea statică și căderea de presiune pe diafragmă pentru diferite deschideri ale robinetului de reglare a debitului. Presiunea barometrică se citește de pe barometrul din laborator. Presiunile citite se vor converti în SI cu ajutorul tabelului 5.5.

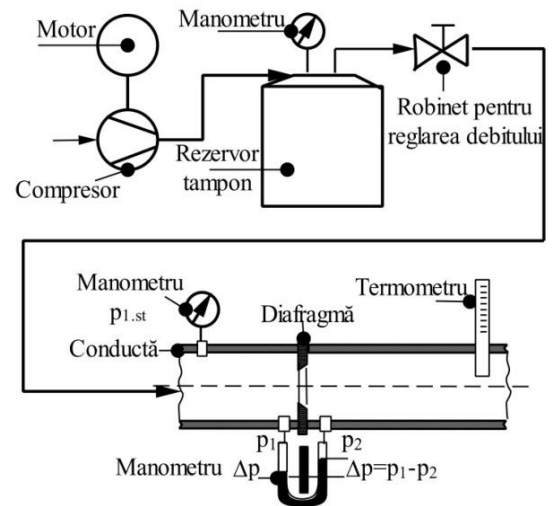


Fig. 5.4 Standul experimental pentru determinarea debitului prin metoda ștrangulării

Tabel 5.5 Relații de conversie a unităților de presiune

	1 Pa = 1 N/m ²	1 kgf/m ²	1 hPa = 1 mbar	1 at = kgf/cm ²	1 atm
Pa = N/m ²	1	9,80665	100	9,80665 · 10 ⁴	101325

Tabel 5.5 Relații de conversie a unităților de presiune - continuare

	1 Pa = 1 N/m ²	1 mmHg	1 mmH ₂ O	1 bar	1 Psi = 1 lbf/in ²
Pa = N/m ²	1	133,322	9,80665	10 ⁵	6894,757

5.3 Prelucrarea datelor și rezultatele măsurătorilor

Valorile măsurate experimental sunt trecute în tabelul 5.6, după care sunt transformate în SI cu ajutorul tabelului 5.5. Determinarea debitului prin această metodă, presupune parcurgerea unui algoritm complex de calcul. Acest algoritm de calcul are mai multe etape de evaluare a debitului. Următorul pas constă în alegerea și calcularea unor mărimi prezentate în descrierea lucrării și în partea de noțiuni teoretice, valorile obținute sunt sintetizate în tabelul 5.7 pentru ușurarea calculelor. În prima etapă de evaluare a debitului se pornește de la premisa că debitul volumic de aer este constant pe toată lungimea conductei și are valoarea $\dot{V} = 0,003$ [m³/s]. Pornind de la această ipoteză se urmează algoritmul de calcul prezentat în tabelul 5.8, până se ajunge la valoarea debitului volumic real \dot{V}_{real} [m³/s] ținând cont de secțiunea de ștrangulare, după care se calculează abaterea coeficientului de debit $\Delta\alpha$ cu relația (5.23).

Tabel 5.6 Mărimi măsurate și transformate în SI

Mărimea	Notăția	UM	Determinarea	
			1	2
Presiunea barometrică	p_b	[mbar]		
		[N/m ²]		
Presiunea aerului înainte de ștrangulare	$p_{1.st}$	[kgf/cm ²]		
		[N/m ²]		
Presiunea absolută a aerului înainte de ștrangulare	$p_{1.abs}$	[N/m ²]		
Căderea de presiune pe diafragmă	$\Delta p = p_1 - p_2$	[_____]		
		[_____]		
		[N/m ²]		
Raportul presiunilor	$\Delta p / p_{1.abs}$	[-]		
Temperatura aerului din conductă	t	[°C]		
	T	[K]		

Tabel 5.7 Mărimi date în cadrul lucrării și mărimi calculate

Mărimea	Notat	UM	Valoarea	
Presiunea fizică normală	p_N	[N/m ²]	101325	
Temperatura fizică normală	T_N	[K]	273,15	
Diametrul conductei	d_1	[mm]	20	
		[m]		
Diametrul orificiului diafragmei	d_0	[mm]	10	
		[m]		
Aria secțiunii conductei (relația 5.10)	A_1	[m ²]		
Aria secțiunii orificiului diafragmei (relația 5.11)	A_0	[m ²]		
Coeficient de strângulare (relația 5.9)	$m=\beta^2$	[-]		
Viscozitatea cinematică a aerului la temperatura t_a [°C] (Tabelul 5.2)	$\nu_{aer}^{(t_a)}$	[m ² /s]		
Densitatea aerului (relația 5.21)	ρ	[kg/m ³]		
Rugozitatea medie a țevilor	k_r	[mm]	0,05	
Raportul d_1/k_r	d_1/k_r	[-]		
Rugozitatea relativă (Tabelul 5.4)	r_0	[-]		
Coeficient de expansiune (Fig. 5.3)	ϵ_e	[-]		
Coeficient de corecție pentru diafragmă de bronz	k_t	[-]	1,00	

Tabel 5.8 Prima evaluare a debitului

Mărimea	Notăție	UM	Determinarea	
			1	2
Debitul volumic de aer	\dot{V}	[m ³ /s]	0,003	0,003
Viteza aerului din conductă (relația 5.18)	w	[m/s]		
Numărul Reynolds (relația 5.17)	Re	[-]		
Factorul de corecție al rugozității (relația 5.20)	r_{Re}	[-]		
Coeficient de debit pentru diafragme cu prize de presiune la față (tabelul 5.3)	α_0	[-]		
Coeficient de debit corectat (relația 5.19)	α_d	[-]		
Debitul volumic real (relația 5.26)	\dot{V}_{real}	[m ³ /s]		
Abaterea relativă (relația 5.23)	$\Delta\alpha$	[%]		
Debitul masic (relația 5.27)	\dot{m}_{real}	[kg/s]		

Dacă abaterea relativă, după prima evaluare a debitului, $\Delta\alpha$ este mai mare de 0,5%, se determină din nou debitul recalculând coeficienții de debit. În a doua etapă de evaluare a debitului se consideră că debitul volumic de aer din conductă este egal cu cel obținut la prima evaluare și se reia algoritmul de calcul prezentat în tabelul 5.9. Calculul se oprește când abaterea $\Delta\alpha$ este mai mică de 0,5%; indiferent de numărul de iterații a algoritmului.

Tabel 5.9 A doua evaluare a debitului

Mărimea	Notăție	UM	Determinarea	
			1	2
Debitul volumic de aer	\dot{V}	[m ³ /s]		
Viteza aerului din conductă (relația 5.18)	w	[m/s]		
Numărul Reynolds (relația 5.17)	Re	[-]		
Factorul de corecție al rugozității (relația 5.20)	r_{Re}	[-]		
Coeficient de debit pentru diafragme cu prize de presiune la față (tabelul 5.3)	α_0	[-]		
Coeficient de debit corectat (relația 5.19)	α_d	[-]		
Debitul volumic real (relația 5.26)	\dot{V}_{real}	[m ³ /s]		
Abaterea relativă (relația 5.23)	$\Delta\alpha$	[%]		
Debitul masic (relația 5.27)	\dot{m}_{real}	[kg/s]		