

## 7 Determinarea curbei debitului în funcție de raportul presiunilor la un compresor cu piston

În cadrul acestei lucrări de laborator sunt prezentate noțiunile teoretice cu privire la un compresor cu piston, instalația utilizată pentru determinarea curbei debitului în funcție de raportul presiunilor, modul de lucru precum și procedura de prelucrare și interpretare a rezultatelor obținute.

**Scopul lucrării** este trasarea curbei debitului în funcție de raportul presiunilor utilizând instalația din dotarea laboratorului.

### 7.1 Noțiuni teoretice

Compressoarele sunt mașini termice generatoare, care prin consum de lucru mecanic realizează mărirea presiunii gazelor sau a vaporilor [36].

Compresorul aspiră aer dintr-o sursă de joasă presiune, îi mărește presiunea și îl refulază într-o încălț de presiune ridicată. Compresorul este acționat de un motor electric, energia electrică fiind transformată în energie potențială de presiune a aerului [46]. Compressoarele se întâlnesc în aproape toate ramurile industriale: la transportul fluidelor, în instalațiile de turbine cu gaze, în instalațiile frigorifice, de uscare, de ardere, pompe de căldură, acționarea unor agregate, sisteme de reglaj și comandă etc. [36].

*Compresorul cu piston* (Fig. 7.1) se compune, în principiu, din următoarele elemente: cilindru, piston, chiulasa în care sunt montate supapa de aspirație (care permite intrarea gazului în cilindru) și supapa de refulare (care permite evacuarea gazului din cilindru după comprimare), camera de aspirație, respectiv camera de refulare.

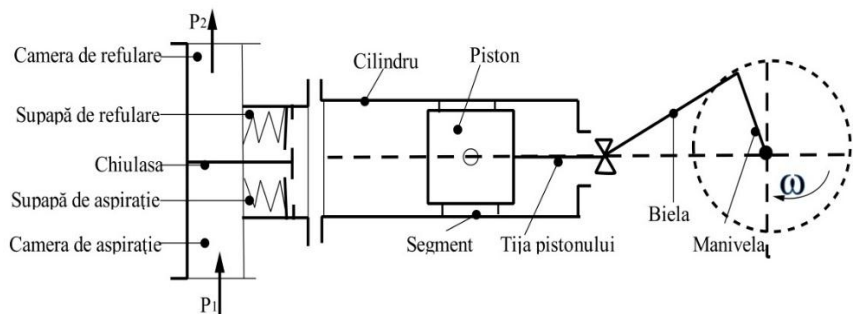


Fig. 7.1 Părțile componente ale unui compresor cu piston

Principiul de funcționare al compresorului cu piston constă în mărirea și micșorarea succesivă a volumului de gaze dintr-un cilindru cu ajutorul unui piston care execută o mișcare alternativă [47]. Arborele cotit antrenează sistemul bielă manivelă, care face ca pistonul să execute o mișcare rectilinie alternativă. La două curse simple ale pistonului se realizează un ciclu de funcționare complet [48]. Ciclul de funcționare al compresorului cu piston cuprinde patru faze distincte: aspirația, comprimarea, refularea și destinderea.

Digrama teoretică a compresorului tehnic este prezentată în figura 7.2, iar ipotezele care stau la baza construirii acesteia sunt:

- ☞ fluidul de lucru este un gaz perfect;
- ☞ transformările suferite de gaze sunt reversibile;
- ☞ masa de gaz rămâne constantă;
- ☞ nu există pierderi de presiune prin laminare în cadrul procesului de aspirație și refulare;
- ☞ nu există frecare între piston și cilindru [48].

*Aspirația* începe în punctul 4, în momentul în care se deschide supapa de aspirație (SA) și durează până în punctul 1 când se închide supapa. În această etapă are loc umplerea cilindrului cu gaz ( $V_a$ ).

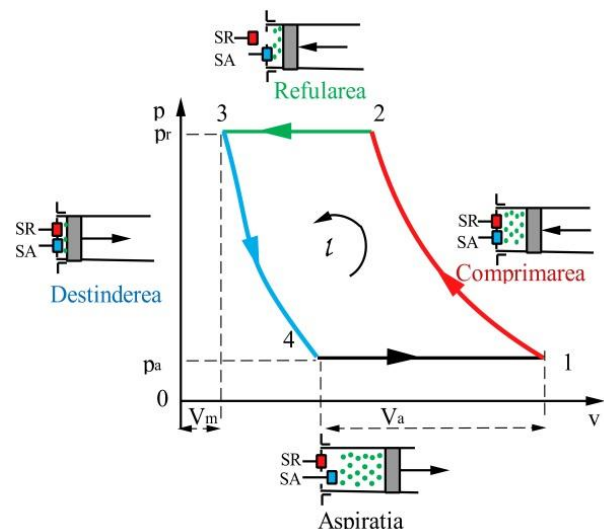


Fig. 7.2 Digrama teoretică a compresorului tehnic cu piston

*Comprimarea* începe în punctul 1, după închiderea supapei de aspirație și durează până în punctul 2 când se deschide supapa de refulare (SR). În timpul acestei faze, gazul își micșorează volumul și își mărește treptat presiunea până la valoarea necesară refulării. În timpul comprimării volumul gazului se micșorează, iar presiunea și temperatura lui se măresc.

*Refularea* începe în punctul 2 în momentul în care se deschide supapa de refulare, sub acțiunea presiunii gazului din cilindru. În timpul acestei faze, presiunea rămâne constantă deoarece cilindrul comunică direct cu conducta de refulare.

*Destinderea* are loc din momentul în care s-a închis supapa de refulare din punctul 3, până când se deschide supapa de aspirație în punctul 4. Când se închide supapa de refulare gazul cuprins în spațiul mort  $V_m$ , la presiunea de refulare, își mărește volumul și își micșorează presiunea până când ajunge puțin sub limita de aspirație. În acest moment se deschide supapa de aspirație și reîncepe un nou ciclu. În timpul destinderii volumul gazului se mărește, iar presiunea și temperatura lui se micșorează.

Dacă se înlătură ipoteza conform căreia nu există pierderi de presiune prin laminare în cadrul procesului de aspirație și refulare (conform căreia supapele se deschid instantaneu) se obține diagrama indicată a compresorului tehnic cu piston (Fig. 7.3). Influența laminării gazului în timpul aspirației se manifestă prin pierderi gazodinamice, care fac ca presiunea medie din cilindru în timpul aspirației să fie mai mică decât presiunea din galeria de admisie. În timpul refulării, pentru acoperirea pierderilor gazodinamice din supapă, presiunea medie din cilindru trebuie să fie mai mare decât presiunea din galeria de refulare. La începutul admisiei și la începutul refulării, când supapele încă nu sunt complet deschise, diferențele de presiune au valorile maxime [49].

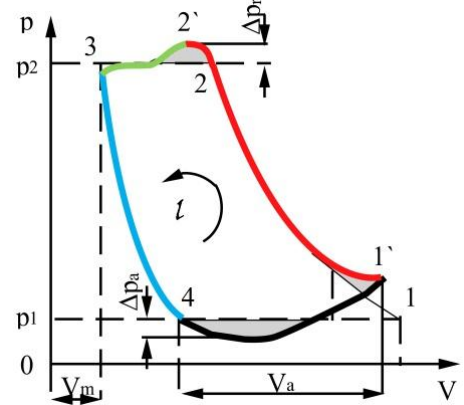


Fig. 7.3 Diagrama indicată a compresorului tehnic cu piston

La începutul cursei de aspirație gazul deschide supapa de aspirație când presiunea din cilindru este inferioară presiunii  $p_1$  din conducta de aspirație cu o diferență  $\Delta p_a$  necesară pentru deschiderea supapei la începutul cursei de aspirație, jocul supapei înainte de deschiderea completă apare ca oscilații neregulate ale curbei în vecinătatea punctului 4. În punctul 4 se deschide supapa simultan cu schimbul cursei pistonului, între punctele 1 și 2 gazul este comprimat după o curbă politropă, până la o presiune superioară  $p_2$  cu o diferență  $\Delta p_r$  necesară pentru deschiderea supapei de refulare. În punctul 2 apar oscilații neregulate datorită jocului supapei de refulare [50].

Pentru a evita lovitura pistonului în capacul compresorului (care ar da dilatări neegale ale cilindrului) lungimea cursei pistonului trebuie să fie mai mică. Se observă că la sfârșitul cursei de evacuare, în cilindru mai rămâne volumul  $V_m$ , volum care ocupă spațiul mort. Rolul acestui volum de gaz neevacuat este de a proteja compresorul la suprasolicitări mecanice cauzate de o eventuală blocare a supapelor sau de incompresibilitatea lichidelor pătrunse întâmplător în cilindru [46].

*Modul de determinare a presiunii maxime* la un compresor cu piston cu o singură treaptă de comprimare, sau influența spațiului mort asupra volumului de gaz aspirat este prezentat în figura 7.4. Pentru determinarea presiunii maxime, la compresorul cu piston cu o singură treaptă de comprimare, se impune ca volumul de gaz aspirat și coeficientul volumic (gradul de umplere) să fie nul. Rezultă astfel că și debitul compresorului este nul. Se observă că gazul din cilindru compresorului se comprimă și se destinde după aceeași curbă (se confundă). În concluzie, valoarea presiunii de refulare  $p_r$  trebuie să aibă valori strict mai mici decât  $p_{2max}$ . Prin mărirea raportului de comprimare, respectiv a presiunii de refulare, ciclul de funcționare al compresorului real se modifică, în sensul că volumul de gaz aspirat se diminuează; ceea ce conduce la reducerea de gaz vehiculat. Diminuarea volumului de gaz aspirat se datorează faptului că destinderea gazului rămas ocupă o cantitate mai mare din cursa efectuată de piston. Raportul de comprimare

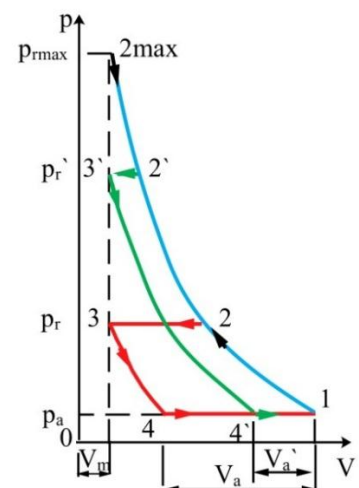


Fig. 7.4 Modul de determinare a presiunii maxime

influențează în mod semnificativ valoarea coeficientului volumic, adică a gradului de umplere. Valoarea coeficientului volumic (a gradului de umplere) este influențată de mărimea spațiului mort, de raportul de comprimare și de natura gazului vehiculat în compresor. Odată cu creșterea spațiului mort scade valoarea coeficientului volumic, și invers, reducerea spațiului mort conduce la creșterea coeficientului volumic [47]. În realitate, presiunea maximă  $p_{2max}$  depinde și de temperatura de refulare a gazului, care în general nu poate depăși 453K deoarece uleiul utilizat pentru ungere se cocsifică la 470K [2, 49].

În figura 7.5 sunt prezentate principalele mărimi care caracterizează compresorul:

- ☞ volumul total al cilindrului ( $V_1$ ) este volumul cuprins între chiulasă și piston, când acesta se află în punctul mort superior (Pms);
- ☞ volumul spațiului mort ( $V_3$  sau  $V_m$ ) este volumul cilindrului cuprins între chiulasă și piston, când acesta se află în punctul mort inferior;
- ☞ volumul cursei sau cilindreea ( $V_c$ ) este volumul cilindrului cuprins între cele două poziții extreme ale pistonului: punctul mort inferior (Pmi) și punctul mort superior (Pms).

Cilindreea se poate exprima cu relațiile:

$$V_c = (\pi \cdot d^2 \cdot x) / 4 \quad [\text{m}^3 / \text{cil.rot}] \quad (7.1)$$

$$V_c = V_1 - V_3 = V_1 - V_m \quad (7.2)$$

unde:  $d$  [m] este diametrul cilindrului, iar  $x$  [m] - cursa pistonului.

Volumul aspirat ( $V_a$ ) de compresor:

$$V_a = V_1 - V_4 \quad [\text{m}^3] \quad (7.3)$$

Volumul refulat ( $V_r$ ) de compresor:

$$V_r = V_2 - V_3 = V_2 - V_m \quad [\text{m}^3] \quad (7.4)$$

Raportul de comprimare ( $\epsilon_c$ ):

$$\epsilon_c = p_r / p_a \quad [-] \quad (7.5)$$

Coefficientul spațiului mort sau spațiul mort relativ sau gradul volumetric de compresie ( $m_m$ ) ne arată cât la sută din volumul cilindreei reprezintă volumul spațiului mort:

$$m_m = \frac{V_m}{V_c} = \frac{V_3}{V_c} = \frac{V_3}{V_1 - V_3} \quad [-] \quad (7.6)$$

Gradul de umplere sau coeficientul de debit sau coeficientul de umplere ( $\mu_u$ ) ne arată cât la sută din volumul cilindreei reprezintă volumul de gaz aspirat:

$$\mu_u = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_1 - V_4}{V_1 - V_m} = \frac{V_1 - V_4}{V_1 - V_3} \quad [-] \quad (7.7)$$

Randamentul de debit ( $\lambda_d$ ) al compresorului influențează raportul de comprimare, coeficientul spațiului mort relativ și coeficientul de umplere. Acesta se definește cu relația:

$$\lambda_d = \mu_u \cdot \frac{T_a}{T_{sa}} \quad [-] \quad (7.8)$$

unde:  $T_a$  [K] este temperatura aerului la aspirație;  $T_{sa}$  [K] - temperatura aerului la sfârșitul aspirației.

Influența grupată a parametrilor: gradul de umplere ( $\mu_u$ ), randamentul de debit ( $\lambda_d$ ), coeficientul spațiului mort ( $m_m$ ) și raportul de comprimare ( $\epsilon_c$ ) asupra debitului de refulare se determină experimental, folosind metoda determinării debitului prin umplerea unui rezervor etalonat de volum  $V$ .

Cantitatea de gaz ce se găsește într-un astfel de recipient la  $T_1$  și  $p_1$  este dată de relația:

$$m_1 = \frac{p_1 \cdot V}{R \cdot T_1} \quad [\text{kg}] \quad (7.9)$$

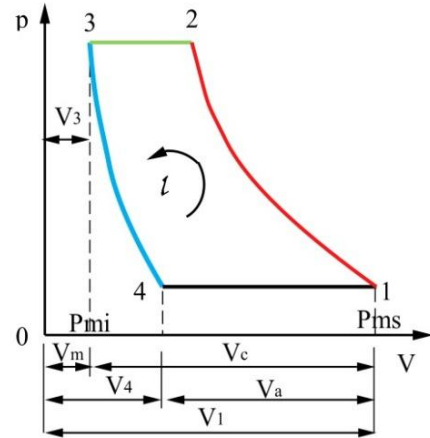


Fig. 7.5 Ciclul de funcționare și mărimile caracteristice ale compresorului

Dacă în acest recipient se introduce o cantitate de  $m$  kg de gaz, presiunea și temperatura vor crește la  $p_2$  și  $T_2$ . Cantitatea de gaz ce rezultă în recipient este:

$$m_2 = \frac{p_2 V}{R \cdot T_2} = m + \frac{p_1 V}{R \cdot T_1} \quad [\text{kg}] \quad (7.10)$$

unde:  $p_1$  [ $\text{N}/\text{m}^2$ ] este presiunea în recipient la începutul măsurătorii;  $p_2$  [ $\text{N}/\text{m}^2$ ] - presiunea în recipient la sfârșitul măsurătorii;  $T_1$  [K] - temperatura aerului din rezervor la începutul măsurătorii;  $T_2$  [K] - temperatura aerului din rezervor la sfârșitul măsurătorii;  $V$  [ $\text{m}^3$ ] - volumul ocupat de gaz;  $R$  - constanta de gaz perfect pentru aer,  $R=287,14\text{J}/(\text{kgK})$ . Rezultă că:

$$m = \frac{V}{R} \left( \frac{p_2}{T_2} - \frac{p_1}{T_1} \right) \quad [\text{kg}] \quad (7.11)$$

$$m = m_2 - m_1 \quad [\text{kg}] \quad (7.12)$$

Debitul compresorului reprezintă cantitatea de gaz refulată, în regim normal de funcționare, în unitatea de timp. Se distinge astfel debitul masic  $\dot{m}$  [ $\text{kg}/\text{s}$ ],  $\dot{V}_N$  [ $\text{m}^3_N/\text{s}$ ] debitul volumic la condiția stării normale,  $\dot{V}$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] debitul volumic exprimat în funcție de condițiile de presiune și temperatură la refulare [49]. Pentru o variație a presiunii și temperaturii de la  $p_1$ ,  $T_1$  la  $p_2$ ,  $T_2$  în  $\tau$  secunde, debitul masic este dat de relația:

$$\dot{m} = \frac{m}{\tau} \quad [\text{kg}/\text{s}] \quad (7.13)$$

iar debitul volumic este dat de relația:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (7.14)$$

cunoscând că:

$$\rho = \rho_N \cdot \frac{p_b + p_2}{p_N} \cdot \frac{T_N}{T_2} \quad [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (7.15)$$

unde:  $\rho_N$  este densitatea aerului la starea normală,  $\rho_N=1,2928\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $p_b$  [ $\text{N}/\text{m}^2$ ] - presiunea barometrică;  $p_2$  [ $\text{N}/\text{m}^2$ ] - presiunea din recipientul etalon la finalul fiecărei măsurători;  $p_N$  - presiunea aerului la starea normală,  $p_N=101325\text{N}/\text{m}^2$ ,  $T_N$  - temperatura la starea normală,  $T_N=273,15\text{K}$ ,  $T_2$  [K] - temperatura aerului din rezervor la sfârșitul fiecărei măsurători.

Debitul volumic la condițiile stării normale, se determină cu relația:

$$\dot{V}_N = \dot{V} \cdot \frac{p_b + p_2}{p_N} \cdot \frac{T_N}{T_2} = \dot{V} \cdot \frac{\rho}{1,2928} \quad [\text{m}^3_N/\text{s}] \quad (7.16)$$

Pe baza rezultatelor obținute se trasează un grafic asemănător cu cel prezentat în figura 7.6:

$$\dot{m} = f(\varepsilon_c) \quad (7.17)$$

unde:  $\varepsilon_c$  este raportul presiunilor:

$$\varepsilon_c = \frac{p_r}{p_a} = \frac{p_r}{p_b} \quad (7.18)$$

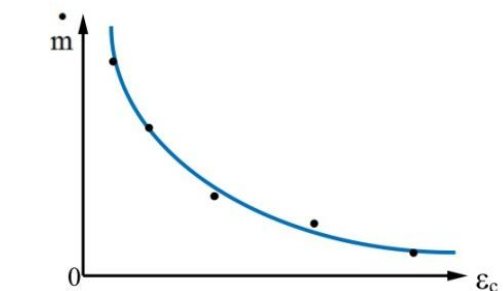


Fig. 7.6 Curba de variație a debitului masic în funcție de raportul presiunilor

## 7.2 Descrierea instalației și desfășurarea lucrării

Instalația experimentală utilizată pentru determinarea curbei debitului în funcție de raportul presiunilor la un compresor cu piston este compusă din: compresorul acționat de un motor electric, un recipient intermediar prevăzut cu un manometru pentru citirea presiunii de refulare, un ventil de reglare, un recipient etalonat cu  $V=0,262\text{m}^3$  echipat cu un manometru, termometru, o supapă de siguranță și două ventile de golire. Schema instalației pentru determinarea curbei debitului în funcție de raportul presiunilor este redată în figura 7.7.

Lucrarea se va desfășura astfel:

- ☞ se citește presiunea barometrică ( $p_b$ ) de pe barometrul montat în laborator și care este egală presiunea de aspirație ( $p_a$ );
- ☞ se pune în funcțiune compresorul și se aduce la regim normal de lucru;
- ☞ se menține o presiune de refulare ( $p_r$ ) constantă în recipientul intermediar cu ajutorul ventilului de reglare (pentru început se poate alege 2 sau 3  $\text{kgf/cm}^2$ , la fiecare nouă măsurătoare aceasta se mărește cu 1  $\text{kgf/cm}^2$ );
- ☞ se citesc parametrii inițiali  $p_1$  și  $t_1$  din recipientul etalon, pornind în același timp cronometru. Se cronometrează timpul în care se ajunge la valoarea aleasă pentru  $p_2$ , citind apoi și temperatura  $t_2$ ;
- ☞ în acest interval de timp, presiunea în recipientul intermediar se menține constantă prin manevrarea ventilului de reglare. Se impune ca diferența de presiune dintre recipientul etalon și recipientul intermediar să fie de cel puțin 1  $\text{kgf/cm}^2$  (când se ajunge la citirea finală  $p_2$ );
- ☞ se repetă măsurătorile pentru diferite presiuni realizate în recipientul intermediar, notându-se de fiecare dată  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  și  $\tau$ ;
- ☞ pe baza rezultatelor obținute se trasează curba debitului în funcție de raportul presiunilor.

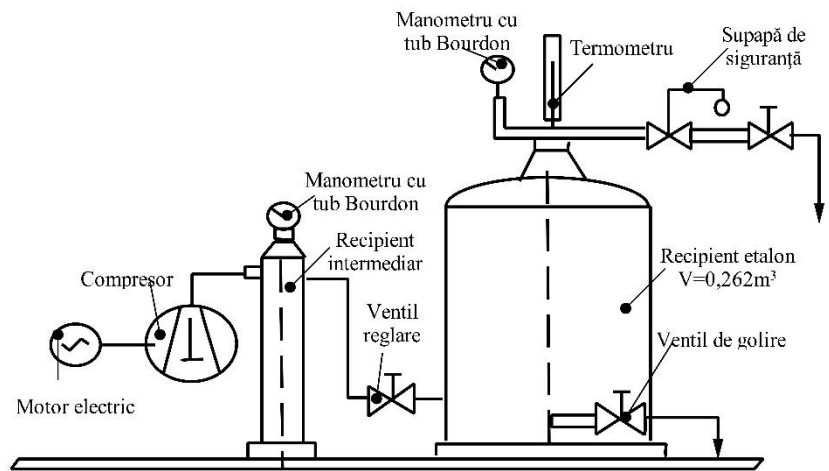


Fig. 7.7 Schema instalației experimentale pentru determinarea curbei debitului în funcție de raportul presiunilor la un compresor cu piston

### 7.3 Prelucrarea datelor și rezultatele măsurătorilor

Valorile măsurate sunt transformate în sistem internațional și centralizate în tabelul 7.1. Mărimile calculate sunt centralizate în tabelul 7.2, iar apoi se trasează curba de variație a debitului în funcție de raportul presiunilor în figura 7.8.

Tabel 7.1 Valori măsurate

1	Mărimea	Simbol mărime	U.M.	Determinarea				
				1	2	3	4	5
1.	Presiunea de aspirație (presiunea barometrică)	$p_a=p_b$	[mbar]					
			[N/m <sup>2</sup> ]					
2.	Presiunea de refulare (presiunea din recipientul intermediar)	$p_r$	[kgf/cm <sup>2</sup> ]					
			[N/m <sup>2</sup> ]					
3.	Presiunea în recipientul etalon la începutul măsurătorii	$p_1$	[bar]					
			[N/m <sup>2</sup> ]					
4.	Presiunea în recipientul etalon la sfârșitul măsurătorii	$p_2$	[bar]					
			[N/m <sup>2</sup> ]					
5.	Timpul în care presiunea crește de la $p_1$ la $p_2$	$\tau$	[s]					
6.	Temperatura aerului în recipientul etalon la începutul măsurătorii		$t_1$	[°C]				
			$T_1$	[K]				
7.	Temperatura aerului în recipientul etalon la sfârșitul măsurătorii		$t_2$	[°C]				
			$T_2$	[K]				



Tabel 7.2 Mărimi calculate

Nr. Crt.	Mărimea	Sim-bol	U.M.	Determinarea				
				1	2	3	4	5
1.	Masa de aer din recipient la începutul măsurătorii (relația 7.9)	$m_1$	[kg]					
2.	Masa de aer din recipient la finalul măsurătorii (relația 7.10)	$m_2$	[kg]					
3.	Masa de aer introdusă la fiecare nouă măsurătoare (relația 7.12)	$m$	[kg]					
4.	Debitul masic de aer (relația 7.13)	$\dot{m}$	[kg/s]					
			[kg/h]					
5.	Densitatea aerului din rezervor (relația 7.15)	$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]					
6.	Debitul volumic de aer (relația 7.14)	$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> /s]					
			[m <sup>3</sup> /h]					
7.	Debitul volumic de aer la condițiile stării normale (relația 7.16)	$\dot{V}_N$	[m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /s]					
			[m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /h]					
8.	Raportul de comprimare (relația 7.18)	$\varepsilon_c$	[-]					

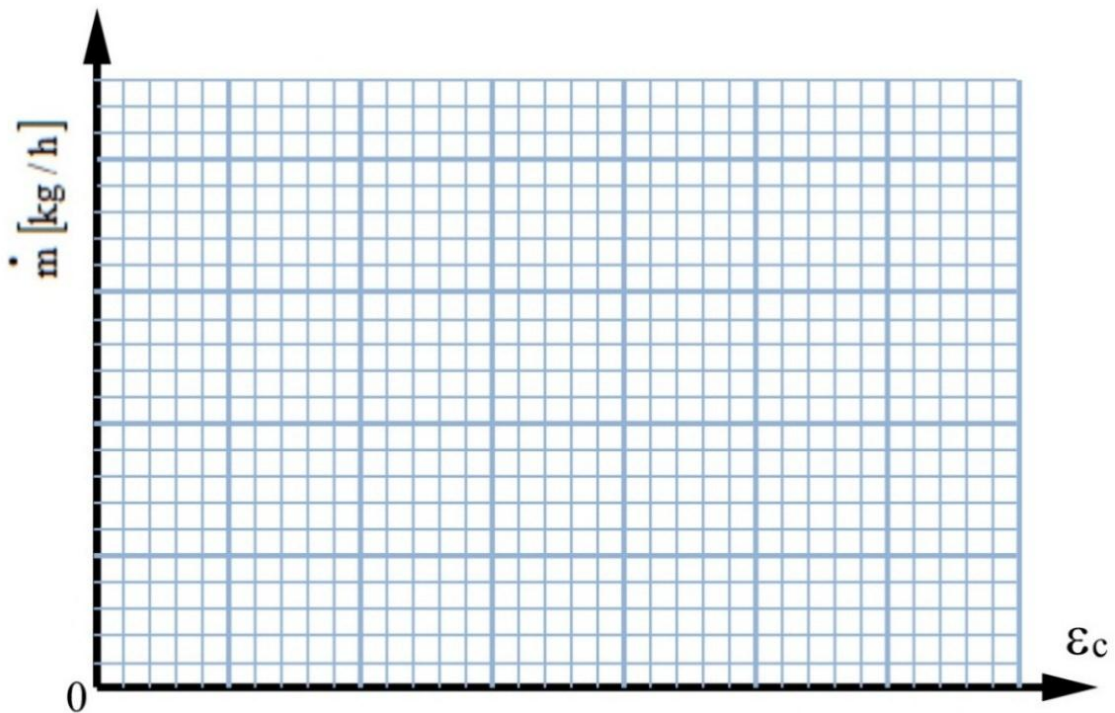


Fig. 7.8 Curba de variație a debitului masic în funcție de raportul presiunilor