

## DETERMINAREA VÂSCOZITĂȚII LICHIDELOR PRIN METODA CORPULUI ROTITOR

### 3.1. Considerații teoretice

Vâscozitatea este proprietatea fluidelor de a se opune deformării (mișcării) prin dezvoltarea unor eforturi tangențiale de frecare (rezistențe) la nivelul suprafeței de separație dintre două particule sau straturi de fluid, între care există diferențe de viteze.

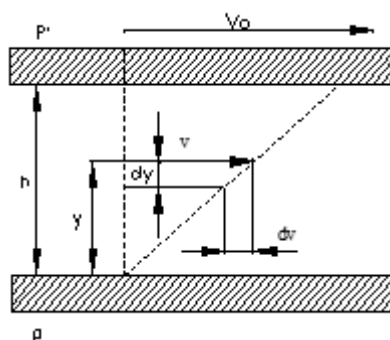


Figura 3.1. Exeriența lui Newton

Pentru ilustrarea acestei proprietăți se recurge la experiența lui Newton (figura 3.1). Placa P' de arie A se deplasează cu viteza  $V_0$ , paralel cu placa fixă P, situată la distanța h.

Datorită „frecării interne” \* în lichidul de densitate  $\rho$ , dispus în straturi paralele infinitezimale de grosime dy, se va stabili o stare de mișcare. Astfel, straturile aflate în contact direct cu plăcile, vor avea aceeași viteză cu acestea în timp ce straturile intermediare vor aluneca unele peste altele, cu viteze v proporționale cu distanța până la placa fixă; prin urmare va lua naștere un gradient de viteză după o direcție normală pe direcția de deplasare, numit și viteză de forfecare:

$$\frac{dv}{dy} = \frac{v_0}{h} \quad (3.1)$$

Vâscozitatea se va manifesta printr-o forță care se opune mișcării plăcii superioare, numită forță de frecare vâscoasă a cărei expresie este:

$$F_f = \eta A \frac{v_0}{h} \quad (3.2)$$

și care raportată la suprafață, conduce la tensiunea tangențială datorată frecării, numită și tensiune de forfecare:

$$\tau = \frac{F_f}{A} = \eta \quad (3.3)$$

În caz general, ținând cont de relația (3.1) , se poate scrie că tensiunea tangențială de forfecare care apare între două straturi situate la distanța  $dy$  și între care există o diferență de viteză  $dv$  are expresia dată de relația lui Newton:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (3.4)$$

Fluidele care respectă această relație se numesc fluide newtoniene (ex. apă, aer, ulei), iar cele care nu o respectă se numesc nenewtoniene și formează obiectul de studiu al reologiei.

Coeficientul de proporționalitate  $\eta$  se numește coeficient de vâscozitate dinamică sau, pe scurt, vâscozitate dinamică și prin ipoteză, pentru fluidele newtoniene, nu depinde de gradientul vitezei, având valoare constantă la o temperatură dată. De aceea, când se vorbește de vâscozitatea unui fluid, trebuie menționată temperatura la care s-a făcut determinarea acesteia.

Pentru caracterizarea vâscozității s-a introdus și coeficientul de vâscozitate cinematică sau, pe scurt, vâscozitatea cinematică notată cu  $\nu$  și dată de relația :

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3.5)$$

\*denumire sugestivă care o completează pe cea de vâscozitate într-o serie de lucrări de referință.

Dimensional, pentru vâscozitatea dinamică  $\eta$  se scrie expresia:

$$[\eta] = \frac{[\tau]}{\left[ \frac{dv}{dy} \right]} = \frac{LMT^{-2} / L^2}{LT^{-1} / L} = L^{-1}MT^{-1}.$$

Deoarece expresia tensiunii tangențiale nu conține mărimi fizice care să caracterizeze fluidul, s-a introdus un coeficient, numit de vâscozitate cinematică, care stabilește o legătură directă între proprietatea de vâscozitate și natura fluidului (caracterizat prin densitatea,  $\rho$ ):

$$[\nu] = \frac{[\eta]}{[\rho]} = \frac{L^{-1}MT^{-1}}{L^{-3}M} = L^2T^{-1}$$

Unitățile de măsură în SI sunt:

$$\langle \eta \rangle_{SI} = \frac{kg}{ms} = \frac{N \cdot s}{m^2} = Pa \cdot s$$

$$\langle \nu \rangle_{SI} = \frac{m^2}{s}$$

În practică se utilizează curent unitățile din sistemul C.G.S. numite:

*Poise*, pentru vâscozitatea dinamică

$$1 \text{ Poise (1P)} = \frac{1 \text{ dyna}}{cm^2} \cdot s = \frac{1g}{cm \cdot s} = 0.1 Pa \cdot s$$

respectiv *Stokes*, pentru vâscozitatea cinematică

$$1 \text{ Stokes (St)} = 1 cm^2 / s = 10^{-4} m^2 / s .$$

Determinarea vâscozității lichidelor se poate face prin mai multe metode: metoda corpului căzător, metoda corpului rotitor, metoda corpului vibrant, metoda corpului oscilant, metoda Engler, etc.

### 3.2 Obiectivele lucrării și metoda utilizată

Lucrarea de față se referă la măsurarea vâscozității prin metoda corpului rotitor. Aparatele care servesc la determinarea viscozității prin această metodă se numesc viscozimetre rotaționale.

În principiu un viscozimetru rotațional constă din două piese coaxiale care conțin în spațiul dintre ele fluidul investigat (Figura 3.2). Pentru determinarea viscozității sau a altor proprietăți reologice ale fluidului (tensiuni de forfecare, tensiuni de prag, histerezis, etc.) uneia dintre piese i se impune o mișcare de rotație cu viteza unghiulară constantă  $\omega$ . Fluidul, datorită viscozității sale, va transmite mișcarea celei de-a doua piese. Aceasta, sub acțiunea momentului dat de forța de frecare vâscoasă care acționează pe suprafața ei (momentul rezistiv) va avea tendința să se rotească în jurul axei sale, în același sens cu prima. Pentru a immobiliza ce-a de-a doua piesă va trebui să i se aplice acesteia un cuplu cu aceeași valoare a momentului  $M$  dar în sens contrar.

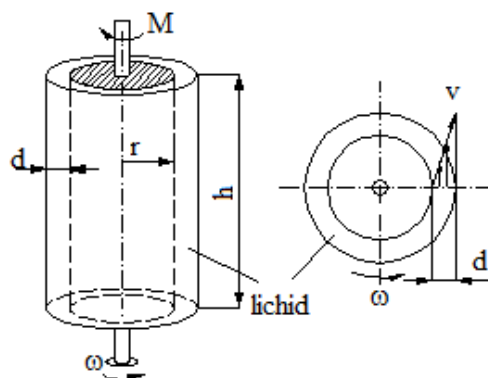


Figura 3.2. Viscozimetru rotațional

În cazul în care cele două piese sunt doi cilindri coaxiali (viscozimetru Couette), cu notațiile din figura 3.2 se poate scrie pentru momentul  $M$  expresia:

$$M = r \cdot A \cdot \tau_0 \quad (3.6)$$

unde:  $A$  - reprezintă aria laterală a cilindrului interior

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad (3.7)$$

iar  $\tau_0$  - reprezintă tensiunea de forfecare

$$\tau_0 = \eta \cdot \frac{dv}{dr} \quad (3.8)$$

cu  $\frac{dv}{dr} = D_r$  - viteza de forfecare

Ținând cont de faptul că distanța  $\delta$ , dintre cei doi cilindri este foarte mică se poate scrie că:

$$D_r = \frac{dv}{dr} = \frac{v_0}{d} \quad (3.9)$$

Respectiv

$$\tau_0 = \eta \cdot \frac{v_0}{d} \quad (3.10)$$

în care  $v_0$  se poate aproxima ca fiind

$$v_0 = \omega \cdot r \quad (3.11)$$

Utilizând relațiile (3.6-3.11) viscozitatea dinamică se poate exprima sub forma:

$$\eta = \frac{\tau_0}{D_r} = \frac{M \cdot d}{2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot v_0} = \frac{M \cdot d}{2 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot h \cdot \omega} \quad (3.12)$$

Prin urmare, pentru un sistem de cilindri cu geometria cunoscută și pentru o viteză de rotație dată, prin măsurarea cu precizie ridicată a valorii momentului rezistiv dat de forțele de frecare vâscoasă, se poate determina cu acuratețe viscozitatea fluidului investigat.

În cazul aparatului Rheotest2 principiul de măsurare a momentului  $M$  este același indiferent dacă cele două piese coaxiale, care constituie sistemul (geometria) de măsurare, sunt:

a) doi cilindri (tip Couette), cu mențiunea că la acest aparat cilindrul interior, de rază  $r$  și înălțime  $h$  este cel care se rotește cu viteza unghiulară  $\omega$ , în timp ce cilindrul exterior (incinta) este fix.

b) un con de rază  $R$  care se rotește cu viteza unghiulară constantă  $\omega$  și o placă fixă, cu un unghi  $\varphi$  de  $0.30^\circ$  între ele.

Piesa care se rotește cu viteza unghiulară  $\omega$  (cilindrul interior în cazul sistemului cu doi cilindri sau conul în cazul sistemului con-placă) este legată prin intermediul axului de măsurare de un arc elicoidal. Devierea spirelor arcului reprezintă o măsură a momentului efectiv  $M$ . Această deviere este sesizată de un potențiomtru rezistiv cu montaj în punte, la care variația diagonalei punții este proporțională cu momentul de rotație  $M$  al spirei arcului.

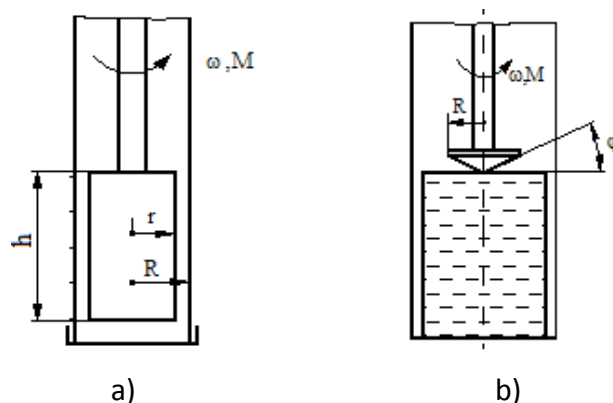


Figura 3.3. Viscozimetru rotațional a) cu cilindru, b) cu con-placă

Prin urmare mărimea care ne interesează, momentul de rotație  $M$ , este transformată într-un semnal electric analog (curentul electric) a cărui intensitate este exprimată prin numărul de diviziuni  $\alpha$  indicate de acul instrumentului de măsurare/afișare.

Intensitatea  $\alpha$  a curentului din diagonala punții este proporțională nu doar cu momentul de rotație  $M$  ci și cu tensiune de forfecare  $\tau_0$  din fanta inelară dintre cei doi cilindrii sau din spațiul dintre con și placă.

Valorile tensiunii de forfecare  $\tau_0$  și a vitezei de forfecare  $D_r$  se pot calcula exact.

Pentru sistemul de doi cilindrii,  $\tau_0$  și  $D_r$  nu sunt constante în fanta inelară. De aceea se tinde spre un raport  $\frac{r}{R} \approx 1$  și se consideră o mișcare laminară pentru fluidul situat între două suprafețe cilindrice aflate în mișcare relativă.

Sunt valabile atunci relațiile:

$$\tau_0 = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot r^2} \quad (3.13)$$

$$\tau_0 = z \cdot \alpha \quad (3.14)$$

unde  $z$  este o constantă ce depinde de geometria sistemului de măsurare și de constanta arcului.

$$D_r = \frac{2 \cdot \omega \cdot r}{R^2 - r^2} \quad (3.15)$$

$$\eta = \frac{\tau_0}{D_r} \quad (3.16)$$

Dacă se utilizează sistemul de măsurare con-placă viscozitatea  $\eta$  se va calcula tot după formula 3.12, dar  $\tau_0$  și  $D_r$ , care în acest caz sunt constante în spalt, vor fi date de expresiile:

$$\tau_0 = \frac{3 \cdot M}{2 \cdot \pi \cdot R^3} \quad (3.17)$$

$$\tau_0 = c \cdot \alpha \quad (3.18)$$

unde  $c$  - o constantă ce depinde de geometria sistemului de măsurare și de constanta arcului

$$D_r = \frac{\omega}{\operatorname{tg} \varphi} \quad (3.19)$$

Așa cum reiese din expresiile de mai sus, unei geometrii de măsurare date și unei viteze de rotație  $\omega$  reglate îi corespunde o valoare calculată a vitezei de forfecare  $D_r$ .

Având în vedere modul în care se face antrenarea în mișcare de rotație a axului de măsurare, turația acestuia poate fi aleasă dintr-o gamă de 24 de valori.

Vitezele de forfecare  $D_r$ , calculate pentru fiecare din vitezele de rotație  $\omega$  corespunzătoare acestor valori ale turației și pentru fiecare geometrie de măsurare disponibilă, sunt date tabelar, în anexa II a cărții tehnice a aparatului Rheotest2.

Cunoașterea, în urma măsurărilor, a indicației  $\alpha$ , corespunzătoare fiecărei turații respectiv viteze de forfecare reglate, face posibilă calcularea valorii exacte a tensiunii de forfecare și ulterior a valorii viscozității dinamice a fluidului studiat.

În cazul în care se urmărește determinarea viscozității dinamice a unui lichid newtonian, este suficientă efectuarea unei singure măsurători, la orice valoare reglată a turației (respectiv a lui  $\omega$ ) dat fiind faptul că, așa cum se cunoaște deja, pentru acest tip de lichide valoare viscozității nu depinde de viteza de forfecare  $D_r$ , calculată pentru fiecare valoare a lui  $\omega$ .

Se vor face o serie de determinări, la valori diferite ale turației reglate respectiv ale valorilor  $D_r$  corespunzătoare acestora. Valoarea viscozității corespunzătoare unei valori date a vitezei de forfecare se numește viscozitate aparentă:  $\eta = f(D_r)$ .

Caracterizarea comportamentului reologic al unui fluid nenenewtonian se face pe baza "curbei de curgere" a fluidului, denumire care este folosită pentru reprezentarea grafică a dependenței,  $\tau_0 = f(D_r)$ . De menționat că tangentele la grafic în fiecare punct al acestuia, nu reprezintă altceva decât valoare viscozității aparente a fluidului.

Pentru o caracterizare cât mai exactă a comportamentului reologic al unui fluid nenenewtonian se recomandă utilizarea combinată a sistemelor de măsurare cu cilindrii (a) respectiv con-palcă (b).

Acesta din urmă permite solicitarea fluidului cu viteze de forfecare  $D_r$ , implicit tensiuni de forfecare  $\tau_0$  mai mari decât sistemul cu cilindrii:  $D_r$  între  $0.2 \div 1300 \text{ s}^{-1}$  pentru (a) și între  $5.6 \div 4860 \text{ s}^{-1}$  (b) iar  $\tau_0$  între  $1.6 \div 300 \text{ Pa}$  pentru (a) și între  $40 \div 20 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  pentru (b).

Utilizarea combinată a celor două sisteme oferă posibilitatea extinderii domeniului de încercări. Cu sistemul cu cilindrii se pot măsura viscozități în domeniul  $1 \div 1.8 \cdot 10^7 \text{ cP}$  (mPaS) iar cu sistemul con-placă, în domeniul  $8 \div 4 \cdot 10^7 \text{ cP}$  (mPaS).

Valoarea viscozității unui lichid trebuia însoțită de precizarea temperaturii la care a fost determinată. Rheotest2 permite măsurători ale viscozității fluidului în domeniul de temperaturi -  $60^\circ + 150^\circ\text{C}$ .

### 3.3 Descrierea aparaturii

Aparatul Rheotest2, prezentat în figura 3.3, se compune din două module distincte A și B, interconectate prin cablul electric 53.

Modulul A - viscozimetru propriu-zis - conține la rândul său:

a) *Partea de antrenare* constituită din: motorul sincron cu comutarea numărului de poli (6), cutia de viteze cu 12 trepte (7), consola de transmisie (8);

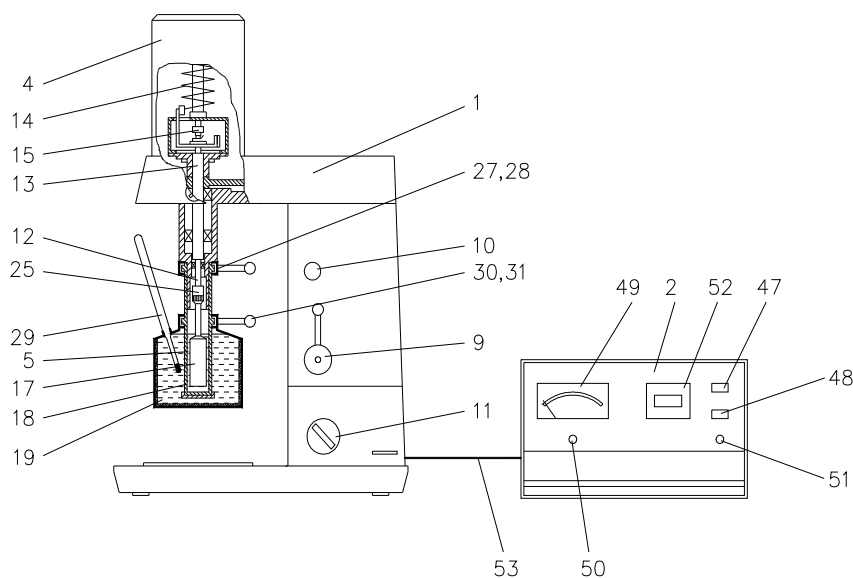


Figura 3.3 Aparatul Rheotest2

b) *Mecanismul de măsurare* (4) care este un convertizor de cuplu mecano-electric. Rotațiile relative ale axului de măsurare (12) față de axul de antrenare (13), efectuate împotriva acțiunii dinamometrului cu 2 trepte (14) sunt redade cu dinamometrul cuplat la potențiometrul (15) montat în punte; semnalul real "momentul de rotație al spirei" se transformă analog într-un curent electric proporțional.

c) *Sistemul de măsurare* este disponibil în două variante:

- *sistemul cu cilindri*: cilindrul rotitor (17), cilindrul incintă (18) și recipientul termostatic (19). Există 5 perechi de cilindri conjugați, care se aleg în funcție de viscozitatea fluidului: N - pentru valori inferioare,  $S(S_1, S_2, S_3)$  pentru valori medii și H pentru valori superioare ale viscozității.

- *sistemul cu placă*: con rotitor în 3 variante  $K_1, K_2, K_3$ , placa fixă, ghidajul plăcii fixe și traductorul de temperatură.

Modulul B - conține sursa de alimentare precum și partea electronică, de măsurare și de afișare a rezultatelor. Întrerupătoarele (47), (48) permit pornirea-oprirea, independente, a motorului respectiv a mecanismului de măsurare.

### 3.4 Modul de desfășurare a experimentelor

Înainte de începerea măsurărilor, este obligatorie verificarea/ aducerea la 0 a instrumentului de afișare. Pentru aceasta, după conectarea la rețea a aparatului, se execută următorii pași:

1) cilindrul rotitor, ales conform tabelului III din cartea tehnică a aparatului, se fixează în axul de măsurare (12) prin intermediul cuplajului 25.

2) se verifică dacă acul indicator este în punctul de 0 al scalei, și dacă nu, se face o punere la 0, mecanic cu butonul 50.

3) se pune în funcțiune aparatul, acționând întâi întrerupătorul 48, apoi întrerupătorul 47. Se alege treapta de turație 8a, cu ajutorul levierului 9 și al comutatorului 11. Se verifică punctul de 0 pe scala 49 a aparatului și (dacă este necesară) aducerea la 0, cu ajutorul butonului 51.

Se introduce apoi în cilindrul incintă (18), fluidul investigat căruia i s-a măsurat temperatura.

Se fixează cilindrul incintă (18), pe mecanismul de măsurare (4), asigurându-se centrarea față de cilindrul rotitor (17) și se blochează cu inelul de prindere (27).

Se verifică în continuare legăturile realizate precum și cuplarea electrică a celor două module după care se poate trece la efectuarea măsurărilor.

Cu ajutorul întrerupătoarelor 48 și 47 se pornesc mecanismul de măsurare și motorul de antrenare al arborelui principal.

Se alege treapta de turație dorită, cu ajutorul levierului (9) și a comutatorului (11) și se citește deviația  $\alpha$  a acului indicator (49) precum și frecvența curentului din rețea, pe frecvențmetrul (52).

Dacă fluidul este unul nenewtonian, și interesează comportamentul său reologic și trasarea curbei de curgere se fac o serie de măsurători, după modelul de mai sus, cu precizarea că e recomandat să se înceapă cu treptele de turație (1a, 2a ..., 12a) și, dacă este nevoie de mai multe puncte să se treacă la treptele de turație (1b, 2b, ... , 12b). În cazul în care vrem să extindem și mai mult domeniul vitezelor de forfecare se poate înlocui sistemul de măsurare cu cilindrii cu cel conplacă.



### 3.5 Prelucrarea rezultatelor

În funcție de alegerea făcută pentru:

- tipul sistemului de măsurare;
- perechea de cilindrii, respectiv tipul de con;
- domeniul I sau II al tensiunilor tangențiale reglat prin comutatorul de domeniu (16) al dinamometrului

Se aleg din Anexa 2, valoarea constantelor  $z$ , respectiv  $c$  și valorile pentru vitezele de forfecare  $D_r$  corespunzătoare fiecărei trepte de turație reglate.

Cu aceste date, considerând și deviația  $\alpha$  a acului indicator (numărul de diviziuni), se poate determina tensiunea de forfecare  $\tau_0$ , calculată după caz cu formula (3.14) sau (3.18), și ulterior viscozitatea cu formula:

$$\eta = \frac{\tau_0}{D_r} \cdot 100 \quad (3.20)$$

Pentru fluidele nenewtoniene, viscozitatea aparentă se calculează cu formula:

$$\eta = \tau_0 \cdot f \quad (3.21)$$

unde

$$f = 100 \cdot D_r^{-1} \quad (3.22)$$

Valoarea lui  $f$  este dată ca și cea a lui  $D_r$ , pentru fiecare turație și fiecare geometrie de măsurare în Anexa 2.

Datele cunoscute, valorile măsurate și cele calculate se vor centraliza în tabelul următor, după care se vor reprezenta grafic  $\tau_0 = f(D_r)$ .

