

Alexandru BOLCU

Sabin Vasile RIZESCU

Laurențiu RACILĂ

Alexandru BOLCU

Sabin Vasile RIZESCU

Laurențiu RACILĂ

MECANICA FLUIDELOR



Editura UNIVERSITARIA
Craiova, 2024

Referenți științifici:

Prof.univ.dr.ing. Marius Marinel STĂNESCU

Conf.univ.dr.ing. Mihai ȚĂLU

Copyright © 2024 Editura Universitaria

Toate drepturile sunt rezervate Editurii Universitaria

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României

BOLCU, ALEXANDRU

Mecanica fluidelor / Alexandru Bolcu, Sabin Vasile Rizescu, Laurențiu

Racilă. - Craiova : Universitaria, 2024

Conține bibliografie

ISBN 978-606-14-2056-8

I. Rizescu, Sabin Vasile

II. Racilă, Laurențiu

53

© 2024 by Editura Universitaria

Această carte este protejată prin copyright. Reproducerea integrală sau parțială, multiplicarea prin orice mijloace și sub orice formă, cum ar fi xeroxarea, scanarea, transpunerea în format electronic sau audio, punerea la dispoziția publică, inclusiv prin internet sau prin rețelele de calculatoare, stocarea permanentă sau temporară pe dispozitive sau sisteme cu posibilitatea recuperării informațiilor, cu scop comercial sau gratuit, precum și alte fapte similare săvârșite fără permisiunea scrisă a deținătorului copyrightului reprezintă o încălcare a legislației cu privire la protecția proprietății intelectuale și se pedepsesc penal și/sau civil în conformitate cu legile în vigoare.

Prefață

Lucrarea de față, deși are un caracter, mai degrabă, succint, prezintă un grad de complexitate și dificultate destul de semnificativ. Autorii s-au rezumat la studiul general al fluidelor ideale și al fluidelor vâscoase newton-ene aflate în curgere laminară.

Urmărind fixarea riguroasă a fundamentelor și a bazei teoretice a Mecanicii Fluidelor, autorii nu au pierdut din vedere că materialul se adresează, totuși, inginerilor și viitorilor ingineri. Astfel, din motive de spațiu, numărul aplicațiilor este redus, punându-se, însă, accent pe comprehensivitatea aplicațiilor rezolvate.

Capitolul 1 face o trecere în revistă a proprietăților generale ale fluidelor. Aspectele expuse se referă atât la fluide compresibile cât și la cele incompresibile. Din simplul motiv că fluidele incompresibile sunt mult mai ușor de înțeles decât cele compresibile, mai multe aprecieri și comentarii s-au făcut asupra celor dintâi, aprecierile și comentariile fiind extinse la cele din urmă. Un accent special a fost pus pe înțelegerea noțiunilor de presiune mecanică și presiune termodinamică și pe cazurile când aceste două presiuni pot fi considerate echivalente.

Capitolul 2 se referă cu precădere la statica fluidelor incompresibile acolo unde presiunea mecanică și presiunea termodinamică sunt echivalente. Se fac referiri la bine cunoscutele aspecte privind legea lui Arhimede și privind transmiterea uniformă a presiunii mecanice în fluidele incompresibile aflate în repaus.

Capitolul 3 destinat cinematicii fluidelor abordează, în detaliu problematicile câmpurilor de viteze și de vârtejuri în fluide. Dincolo de definirea și aprecierile făcute asupra câmpurilor de viteze și de vârtejuri, în sensul definirii liniilor de curent și de vârtej, autorii au alocat un spațiu destul de larg asupra problematicei coexistenței și generării reciproce pentru câmpurile de viteze și vârtejuri. Au fost enunțate și comentate ipotezele fundamentale asumate în cadrul studiului general al Mecanicii Fluidelor. Autorii au considerat că, mai mult decât oriunde în Mecanică și, în general, în Fizică, buna înțelegere a chestiunilor legate de Cinematică este esențială în studiul general al Mecanicii Fluidelor. A fost făcut un studiu mai larg asupra mișcărilor irotaționale (potențiale).

Capitolul 4 aferent dinamicii fluidelor ideale pleacă de la deducerea ecuațiilor de mișcare în formă locală (Euler) plecând de la ecuațiile generale de mișcare ale Mediilor Materiale Continue în forma locală Cauchy. Sunt făcute comentarii și aprecieri asupra posibilităților de scriere a unei ecuații de compresibilitate în formă finită și cum posibilitatea scrierii unei asemenea

ecuații arată că un fluid poate fi barotrop sau nu. Pentru fluide barotrope s-au definit suprafețe Bernoulli și, plecând de la forma generală Helmholtz s-a dedus ecuația Bernoulli pentru o linie de curent (mișcări staționare) și pentru tuburi de curent de curbură mică (mișcări gradual variate). Autorii au găsit de cuviință să deducă riguros și amănunțit și ecuațiile de mișcare în formă globală (Euler-Boussinesq), ele fiind deosebit de necesare mai ales în cazul regimurilor nestaționare când, în instalațiile hidraulice, forțele de inerție capătă un caracter semnificativ. Câteva aplicații cu caracter sugestiv, au fost rezolvate.

Capitolul 5 destinat dinamicii fluidelor vâscoase newton-ene debutează cu evidențierea frecărilor interne vâscoase în fluidelor newton-ene. În această ordine de idei, este definit coeficientul vâscozității dinamice μ . Subliniind caracterul local al vâscozității dinamice μ , este definit coeficientul de vâscozitate cinematică ν . În primă instanță se fac considerații asupra curgerii laminare, în spații închise, a fluidelor newton-ene. Sunt deduse ecuațiile de mișcare în formă locală Navier-Stokes plecând de la ecuația constitutivă a fluidelor vâscoase newton-ene în regim laminar (axiomele Noll). S-a arătat în continuare inexistența integralelor prime pentru ecuațiile Navier-Stokes, indiferent de circumstanțe. Considerațiile făcute în continuare au fost făcute pe exemple de tip aplicativ cu referire directă la curgerile prin conducte și, în general, în spații cu frontiere fixe sau mobile, în acest din urmă caz vitezele fiind constante. Au fost analizate cele două cazuri majore de soluții exacte pentru ecuațiile Navier-Stokes: curgerea Hagen-Poiseuille și curgerea Couette pentru toate cazurile. S-a trecut mai departe la aspecte foarte aplicate legate de similitudine și analiză dimensională. Cu ajutorul acestora s-a arătat că, sub aspect tehnic, curgerile turbulente pot fi abordate, până la urmă, cu aceleași formalisme ca și mișcările laminare. S-a făcut un studiu amănunțit asupra curgerilor prin conducte, asupra pierderilor de presiune și asupra singularităților hidrodinamice. Au fost descrise, pe lard, metodele tehnice de alegere a conductelor pentru diferite regimuri de curgere. În final este dat un exemplu simplu dar cuprinzător de calcul hidrodinamic pentru o instalație hidraulică simplă care funcționează în regim staționar.

Autorii au ales rigurea expunerii ca element definitoriu al acestei lucrări. Autorii își propun ca în cel mai scurt timp să revină cu o lucrare destinată rezolvării de probleme de Mecanica Fluidelor însoțită de probleme rezolvate precum și de probleme propuse cu rezultat afișat.

Orice sugestie din parte cititorilor este bine venită.

Autorii

CAPITOLUL 1 - PROPRIETĂȚILE FLUIDELOR

1.1 Fluiditatea și deformabilitatea

În natură, corpurile se prezintă din punct de vedere al structurii moleculare sub trei forme:

- Solide
- Lichide
- Gaze

Observație: În condiții speciale poate exista o a patra formă - *plasma*.

Solidele au o structură compactă, iar forțele de coeziune (forțe de atracție intermoleculare) sunt importante.

Lichidele au proprietatea de a-și modifica forma sub acțiunea unei solicitări externe mici, particulele alunecând unele față de celelalte datorită unor forțe de coeziune foarte mici, dar suficiente pentru a menține contactul între molecule (spunem că lichidul curge).

Gazele se găsesc într-o stare de agregare în care moleculele tind să ocupe tot volumul care le stă la dispoziție, forțele de coeziune în acest caz fiind extrem de slabe.

Proprietatea lichidelor și gazelor de a-și modifica forma (de a curge) în prezența unor solicitări exterioare mici poartă numele de **fluiditate**.

Deformabilitatea este proprietatea fluidelor de a se deforma, acestea neopunând rezistență la schimbarea formei.

1.2 Omogenitatea și izotropia

Un fluid este **omogen** dacă în orice punct din interiorul său proprietățile fizice sunt identice.

Izotropia este proprietatea unui fluid de a avea aceleași proprietăți în toate direcțiile.

În condiții de repaus, lichidele sunt considerate omogene și izotrope.

1.3 Densitatea (masa specifică)

Densitatea unui fluid este dată de raportul între elementul de masă și elementul de volum.

$$\rho = \frac{dm}{dt} \quad (1.1)$$

În cazul fluidelor omogene, densitatea reprezintă masa unității de volum:

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (1.2)$$

Inversul densității se numește **volum specific**:

$$v = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (1.3)$$

1.4 Greutatea specifică (greutatea volumică)

În cazul unui fluid omogen, **greutatea specifică** este definită ca fiind greutatea unității de volum:

$$\gamma = \frac{G}{V} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (1.4)$$

Între greutatea specifică și densitate există relația:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (1.5)$$

unde: „g” este accelerația gravitațională.

1.5 Compresibilitatea lichidelor

Compresibilitatea este proprietatea lichidelor de a-și modifica volumul sub influența presiunii și/sau temperaturii.

Lichidele supuse unei compresiuni își modifică foarte puțin volumul după o lege similară legii lui Hooke.

$$\Delta p = -\varepsilon \frac{\Delta V}{V} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Pa} \right] \quad (1.6)$$

unde: ε = modulul de elasticitate al lichidului

Δp = variația de presiune

ΔV = variația de volum

Semnul “ - ” arată că mărimile variază în sens invers, adică la o creștere a presiunii corespunde o micșorare a volumului.

Inversul modulului de elasticitate se numește coeficient de compresibilitate:

$$\beta = \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{N}} \right] \quad (1.7)$$

Observație: Un fluid incompresibil este un fluid cu coeficient de compresibilitate nul ($\beta = 0$). Incompresibilitatea este o ipoteză folosită pentru studiul fenomenelor hidraulice.

1.6 Adeziunea și vâscozitatea

La suprafața de contact fluid-solid apar forțe de atracție numite forțe de adeziune. Stratul de fluid aderent cu o grosime de câteva sutimi de milimetri influențează puternic distribuția vitezelor într-un fluid (Fig. 1.1).

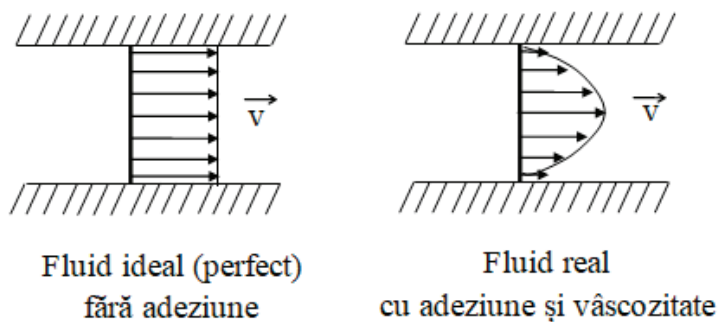


Fig. 1.1 Distribuția vitezelor într-un fluid

Vâscozitatea este proprietatea fluidelor de a opune rezistență la sollicitările tangențiale sau de forfecare (de a opune rezistență la schimbarea formei).

Vâscozitatea, care este datorată interacțiunii între moleculele de fluid, se manifestă doar la fluidele în mișcare.

1.7 Experiența Newton

Efectul vâscozității a fost constatat de Newton printr-o experiență cu plăci plane, una fixă și una mobilă (fig. 1.2).

Pentru a deplasa o placă de suprafață A pe un lichid vâscos de grosime h este necesară o forță F ce imprimă plăcii o viteză v_0 .

Fluidul este presupus ca fiind compus din straturi. Primul strat este în contact cu placa și are viteza v_0 , al doilea strat are o viteză diminuată cu dv , având deci viteza $v_0 - dv$. Ultimul strat aderent la placa fixă va avea viteză nulă.

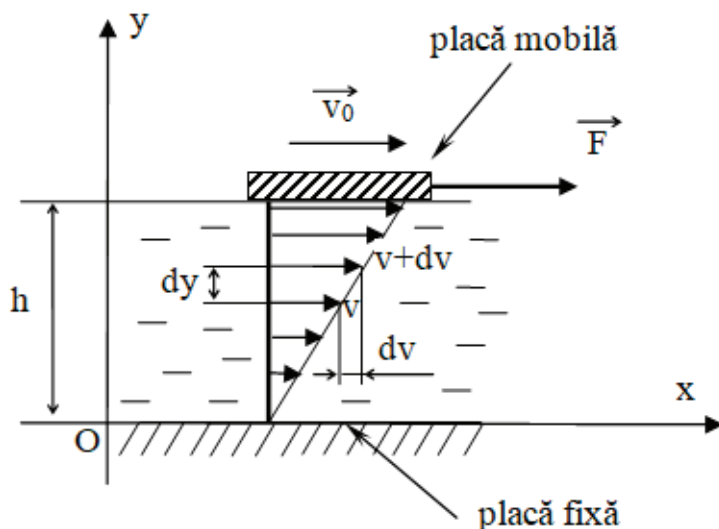


Fig. 1.2 Experiența lui Newton și distribuția de viteze între o placă fixă și una mobilă

Măsurătorile efectuate de Newton au arătat că:

$$F = A\mu \frac{v}{h} \Rightarrow \tau = \mu \frac{v}{h} \quad (1.8)$$

Între două straturi aflate la distanța dy între care există o viteză relativă dv , se obține relația (legea lui Newton):

$$\tau = \mu \frac{dv}{dh} \quad (1.9)$$

În relația anterioară :

- τ reprezintă tensiunea tangențială;

- $\frac{dv}{dh}$ este gradientul vitezei după direcția y (viteza de deformare);
- μ este coeficientul de vâscozitate dinamică sau simplu vâscozitatea dinamică.

Unitatea de măsură a vâscozității dinamice în Sistemul Internațional este:

$$[\mu]_{\text{S.I.}} = \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = \text{Pa} \cdot \text{s}$$

În funcție de vâscozitate, fluidele pot fi:

- Fluide newtoniene, la care vâscozitatea este constantă cu creșterea vitezei;
- Fluide nenewtoniene (reologice), la care vâscozitatea depinde de viteza de curgere.

Vâscozitatea cinematică este dată de raportul:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \quad (1.10)$$

Sunt folosite și alte unități de măsură pentru vâscozitate.

- Pentru vâscozitatea dinamică μ :

Poise: $1 [\text{Po}] = 0,1 [\text{Pa} \cdot \text{s}] = 1 \left[\frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} \right]$

Dyne: $1 [\text{dyn}] = 10^{-5} [\text{N}]$

- Pentru vâscozitatea cinematică ν :

Stockes: $1 [\text{St}] = 1 \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right] = 10^{-4} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$

Vâscozitatea variază, de asemenea, cu temperatura după relația:

$$\nu = \frac{1,78 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,0337t + 0,00022t^2} \quad (1.11)$$

La temperatura de:

- 20°C : $\nu_{\text{H}_2\text{O}}^{20^\circ} \approx 1 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$

- 40°C : $\nu_{\text{H}_2\text{O}}^{40^\circ} \approx 0,66 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$

Densitatea apei: $\rho_{\text{H}_2\text{O}}^{20^\circ} \cong 1000 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

Vâscozitatea se măsoară cu ajutorul unor aparate numite vâscozimetre (Engler, Couette, etc.).

1.8 Absorbția și cavitația

Absorbția este fenomenul prin care gazele și vaporii pătrund prin difuzie în masa unui lichid prin suprafața de separare între cele două.

Absorbția se produce când concentrația gazelor este mai mare decât cea corespunzătoare echilibrului gazelor și crește o dată cu presiunea.

Degajarea gazelor este inversul absorbției.

Dacă presiunea scade atingând presiunea de vaporizare, începe procesul de evaporare și se intensifică cel de degajare al gazelor aflate în lichid.

Fenomenul de formare a vaporilor și de degajare a gazelor în masa unui lichid aflat în mișcare, precum și condensarea lor ulterioară se numește **cavitație**.

Cavitația este un fenomen periculos pentru mașinile și instalațiile hidraulice manifestându-se prin zgomote specifice, vibrații, coroziune.

CAPITOLUL 2 - STATICA FLUIDELOR

Hidrostatica (statica fluidelor) studiază condițiile de echilibru ale lichidelor aflate în repaus.

Un fluid se află în repaus în raport cu un sistem de referință dacă vitezele locale sunt nule în orice punct al domeniului ocupat de lichid.

2.1 Forte ce acționează într-un fluid

Există două tipuri de forțe:

- Forte volumice, care sunt forțe proporționale cu volumul fluidului, fiind notate cu $\vec{F}_v$.
- Forte de legătură sau de suprafață, care sunt proporționale cu aria suprafeței pe care se exercită și sunt notate $\vec{F}_s$.

2.2 Presiunea hidrostatică

Dacă din masa unui fluid se izolează o particulă, asupra acesteia acționează atât forțele volumice cât și cele de suprafață.

După aplicarea tuturor forțelor, particula poate fi considerată corp rigid, pentru care se pot scrie ecuațiile mecanicii generale:

$$m\vec{a} = \vec{F} \quad (2.1)$$

Unde $\vec{F}$ reprezintă rezultanta forțelor care acționează asupra masei de fluid și este de forma:

$$\vec{F} = \vec{F}_v + \vec{F}_s \quad (2.2)$$

În cazul hidrostaticii:

$$\vec{a} = \vec{0} \quad (2.3)$$

Din relațiile anterioare rezulta $\vec{F} = \vec{0}$. Această metodă se numește metoda solidificării.

Considerăm un vas cu lichid aflat în repaus prin care se face o secțiune imaginară verticală, înlăturându-se (virtual) una din părți. Pentru a menține lichidul în aceeași situație este necesar ca pe suprafața ΔA să se aplice o forță ΔF , normală la ΔA .

Presiunea hidrostatică medie este dată de raportul:

$$p_m = \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (2.4)$$

Presiunea hidrostatică într-un punct este dată de relația:

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA} \quad (2.5)$$

Presiunea are ca semnificație fizică efortul unitar de compresie (tensiunea la compresie). Deoarece lichidul este în repaus, nu există componenta tangențială a presiunii (cea care ar determina mișcarea fluidului), deci presiunea hidrostatică este normală la suprafața pe care se exercită (Fig. 2.1).

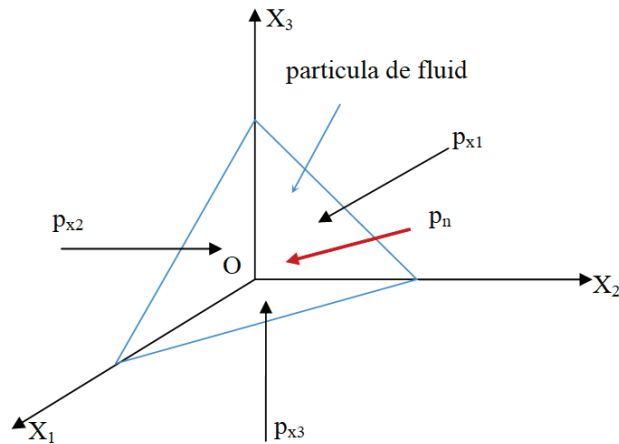


Fig. 2.1 Presiunea pe o particulă de fluid

Așadar, presiunea hidrostatică într-un punct are o valoare unică, independentă de orientarea suprafeței pe care acționează.

Matematic, aceasta proprietate se scrie:

$$p_{x_1} = p_{x_2} = p_{x_3} = p_n \quad (2.6)$$

2.3 Ecuația fundamentală a hidrostaticii

Se consideră un volum V dintr-un lichid în repaus aflat în câmp gravitațional. Volumul este delimitat de suprafața A , asupra volumului acționând atât forțe volumice cât și forțe de suprafață.

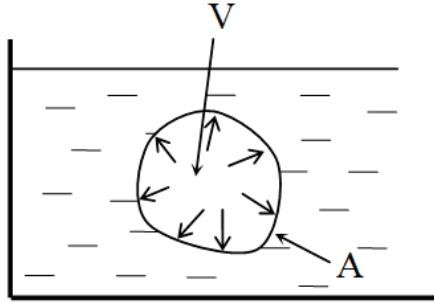


Fig. 2.2 Corp de volum V și arie A scufundat în lichid

Se poate scrie ecuația de echilibru a forțelor:

$$\vec{F}_V + \vec{F}_s = \vec{0} \quad (2.7)$$

Expresia forțelor de suprafață (este o forță de presiune) se scrie:

$$\vec{F}_s = - \int_{(A)} p \cdot d\vec{A} = - \int_{(A)} p \underbrace{\vec{n} dA}_{d\vec{A}} \quad (2.8)$$

Expresia forțelor volumice în câmp gravitațional este:

$$\vec{F}_V = \int_{(V)} \vec{g} dm = \int_{(V)} \rho \vec{g} dV \quad (2.9)$$

Din ultimele relații rezultă că:

$$\int_{(V)} \rho \vec{g} dV - \int_{(A)} p \vec{n} dA = 0 \quad (2.10)$$

Pentru prima integrală se aplică relația Gauss-Ostrogradski, care permite trecerea de la integrala pe suprafață la integrala pe volumul delimitat de acea suprafață:

$$\int_{(A)} p \vec{n} dA = \int_{(V)} \text{grad}(p) dV \quad (2.11)$$

Se obține :

$$\int_{(V)} \rho \vec{g} dV - \int_{(V)} \text{grad}(p) dV = 0 \quad (2.12)$$

La nivel local această ecuație se scrie:

$$\rho \vec{g} - \text{grad}(p) = 0 \quad (2.14)$$

Relația anterioară reprezintă forma vectorială a ecuației fundamentale a hidrostaticii (în câmp gravitațional).

Deoarece:

$$\text{grad}(p) = \frac{dp}{dx_1} \vec{i}_1 + \frac{dp}{dx_2} \vec{i}_2 + \frac{dp}{dx_3} \vec{i}_3 \quad (2.15)$$

și:

$$\vec{g} = 0 \cdot \vec{i}_1 + 0 \cdot \vec{i}_2 + g \cdot \vec{i}_3 \quad (2.16)$$

Se poate scrie:

$$\rho(0 \cdot \vec{i}_1 + 0 \cdot \vec{i}_2 + g \cdot \vec{i}_3) - \left(\frac{dp}{dx_1} \vec{i}_1 + \frac{dp}{dx_2} \vec{i}_2 + \frac{dp}{dx_3} \vec{i}_3 \right) = 0 \quad (2.17)$$

Relația anterioară se poate scrie după cele 3 axe, obținându-se:

$$\begin{cases} \frac{dp}{dx_1} = 0 \\ \frac{dp}{dx_2} = 0 \\ \frac{dp}{dx_3} + \rho g = 0 \end{cases} \quad (2.18)$$

Observație: Presiunea este independentă de direcțiile x_1 și x_2 , ea depinzând doar de direcția x_3 (cota z - adâncimea). Așadar, la adâncime constantă a unui fluid, presiunea este una plană și orizontală.

În cazul unui fluid cu masa volumică constantă se poate integra pe direcția x_3 , obținându-se:

$$p + \rho g z = \text{const.} \quad (2.19)$$

Relația anterioară reprezintă forma scalară a ecuației fundamentale a hidrostaticii.

Dacă se notează cu p_0 presiunea la cota z_0 se obține:

$$p_0 + \rho g z_0 = p + \rho g z \Rightarrow p = p_0 + \rho g(z_0 - z) \quad (2.20)$$

Se obține legea de variație a presiunii hidrostatice:

$$p = p_0 + \rho g h \quad (2.21)$$

în care: p este presiunea totală;

p_0 este presiunea de referință.

În cazul unui recipient deschis $p_0 = p_{\text{atm}}$ (presiunea atmosferică).

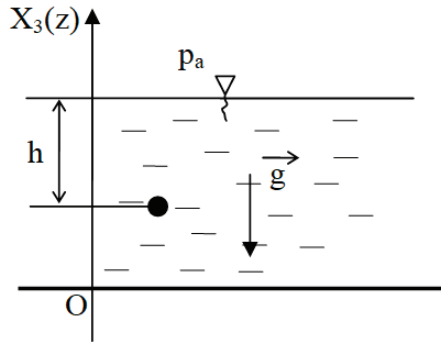


Fig. 2.3 Particula de fluid la adâncimea h

Legea hidrostaticii se mai poate scrie și sub următoarea formă:

$$\frac{p}{\rho g} + z = \text{const.} \quad (2.22)$$

În acest caz termenii din relație se măsoară în "înălțime (metri) coloana de fluid" ($m_{\text{col.l.}}$).

2.4 Presiunea absolută și presiunea relativă

Presiunea absolută sau barometrică notate cu p_{abs} sau p_b se definește ca fiind presiunea măsurată în raport cu vidul (presiunea vidului corespunde presiunii nule, deci $p_{\text{vid}} = 0$).

Presiunea relativă sau manometrică se notează cu p_r sau p_m , se definește în raport cu o presiune de referință, cel mai adesea în raport cu presiunea atmosferică.

$$p_m \equiv p_r = \rho gh$$

$$p_b \equiv p_{\text{abs}} = p_a + \rho gh$$