

## Cuvânt înainte

Acest curs este destinat studenților care se specializează în profilul de „Inginerie economică industrială” al Facultății de Inginerie Managerială, care funcționează în cadrul Universității Ecologice din București, fiind util și studenților care studiază în profil de Ingineria mediului. Prin predarea acestui curs, se dorește înțelegerea minimală a domeniului de inginerie legată de manipularea fluidelor, pe baza noțiunilor de mecanică și analiză matematică predate în cursuri anterioare. Cursul conține aplicații care aplică noțiunile introduse.

## Introducere

*Mecanica* este ramura fizicii care studiază *deplasarea* corpurilor sub acțiunea lor reciprocă sau a forțelor care produc și modifică această deplasare pe parcursul desfășurării ei. Mai multe particule în interacțiune reciprocă formează un sistem de particule.

**Deplasarea**,  $d$ , poate fi pozitivă sau nulă.

$d > 0$  Deplasare propriu zisă

$d = 0$  Imobilitate

Acțiunile reciproce ale particulelor din care este format un sistem mecanic pot fi:

- De atracție, conform legii atracției universale între corpuri, particulele de fluid având mișcare de rotație proprie și translație
- De respingere, la apropiere prea mare, datorită câmpului de electroni și nucleelor atomice.

Ramura mecanicii care se ocupă de starea mecanică a particulelor imobile față de un sistem de referință este **Statica**. În studiul staticii, mărimile fizice derivate care caracterizează fluidul sunt date de densitate, presiune și intensitatea câmpului de forțe.

Mișcarea particulelor înseamnă deplasare, iar ramura mecanicii care analizează mișcarea acestora fără a analiza și cauzele este **Cinematica**. În studiul cinematicii, are

loc migrarea de materie în spațiu, necesitând efectuarea permanentă a bilanțului de masă care se poate afla între anumite frontiere delimitate, constituind un sistem mecanic de particule. Mișcarea particulelor poate fi *uniformă* sau *accelerată*. În studiul cinematicii, se adaugă mărimile fizice derivate care caracterizează mișcarea fluidelor, adică viteza și accelerația. Mișcarea uniformă poate fi după o traiectorie aciclică, în care există cel puțin un punct pe traiectorie prin care particula trece cel mult o singură dată sau poate fi după o traiectorie ciclică, determinată de echilibrul realizat de forțe cu valoare variabilă în timp după o lege de variație ciclică. Mișcarea uniformă se caracterizează de vectorul de viteză constant ca valoare și care poate varia ca direcție și sens. În cazul menținerii unei direcții constante, mișcarea este *rectilinie*. În cazul unei mișcări cu viteză constantă și pe aceeași direcție, mișcarea este rectilinie și uniformă. În cazul în care sensul mișcării se schimbă la intervale egale de timp, menținându-se direcția constantă, mișcarea devine *rectilinie alternativă*. În cazul unor forțe echilibrate care variază după o lege ciclică, traiectoria particulei este, de asemenea, ciclică, în funcție de mărimea forțelor care se compensează. Exemplele frecvent întâlnite de traiectorie ciclică sunt cercul, pentru forțe constante ca valoare, dar cu schimbare permanentă de direcție, determinând *mișcarea circulară uniformă* și elipsa, pentru forțe variabile, mai mari când centrul de rotație este mai aproape de particulă, respectiv mai mici când acesta se află mai departe de particulă, determinând *mișcarea uniformă eliptică*.

De studiul forțelor care acționează asupra fluidelor se ocupă **Dinamica**. În studiul dinamicii, se adaugă mărimile fizice derivate care caracterizează sistemul mecanic, care sunt momentul, forța, energia și puterea. Forțele care acționează asupra unui corp material pot fi în echilibru sau pot determina o forță rezultantă care accelerează acel corp. Dacă masa nu se poate genera, nici consuma în mecanica clasică, momentul și energia pot fi generate sau consumate prin acțiunea forțelor exterioare. În mișcarea fluidelor sub acțiunea forțelor exterioare, se manifestă proprietatea de viscozitate, legată de frecările interne dintre particulele de fluid în mișcare relativă unele față de celelalte. Particulele reprezintă un ansamblu de molecule asociate care într-un interval definit de timp se comportă ca un tot unitar.

*Fluidul* este format dintr-un ansamblu de particule caracterizate printr-o mobilitate relativ ridicată a moleculelor, proprietate care determină deformabilitate și rezistență la rupere practic nulă. Mobilitatea particulelor fluidului este determinată de forțele slabe de atragere sau respingere interioare, la care se pot adăuga forțe exterioare. Starea de agregare a fluidelor poate fi lichidă sau gazoasă. În cazul lichidelor forța de coeziune dintre molecule menține volumul acestora constant, în funcție de temperatură, delimitat de forma vasului în care se află. Volumul lichidului este totdeauna mai mic sau egal cu volumul vasului, prezentând o suprafață liberă de

interfață orientată în direcția perpendiculară pe rezultanta dintre forțele exterioare aplicate și forțele de masă (produse de câmp).

Fiind format din particule materiale, fluidul se supune legilor mecanicii clasice și poate fi analizat prin mărimi mecanice: lucru mecanic, energie, putere. Mișcarea fluidelor este de natură mecanică și va fi analizată prin legea de conservare a masei, prin teorema impulsului și prin bilanțul de energie.

Pentru temperaturi și presiuni moderate (majoritatea cazurilor), lichidele pot fi considerate incompresibile, adică nu își modifică volumul. Gazele sunt fluide compresibile și a căror variație de volum este importantă atunci când variază presiunea sau temperatura. Din punct de vedere a compoziției, fluidele pot fi omogene, formate dintr-o singură substanță, sau eterogene, ca amestecuri din mai multe substanțe. Din punct de vedere a numărului de faze (gazoasă, lichidă sau solidă), fluidele pot fi într-o singură fază, când sunt denumite „fluide”, sau să conțină mai multe faze, când sunt denumite „fluide multifazice”. Gazele sunt perfect miscibile, de aceea nu există mai mult de o fază gazoasă în fluid. Lichidele pot fi nemiscibile formând mai multe faze. Solidele prezente într-un fluid pot fi suspendate în acesta dacă faza principală din fluid este lichidul sau gazul. Fluidele în care faza principală este solidul sunt formate din particule solide deformabile care înglobează lichid sau gaz (exemplu: pasta de dinți, gelul).

Din punct de vedere mecanic, fluidul poate fi modelat la nivel microscopic ca *un corp continuu material* sau prin corelații statistice aplicate unui *sistem de particule de fluid*, în mișcare relativă unele față de altele. Modelarea microscopică este utilizată cu rezultate foarte bune pentru curgerea fluidelor omogene, în timp ce în fluidele eterogene apare schimbarea structurii acestora în urma mișcării relative a particulelor diferite, cu efect asupra eficienței omogenizării acestora și a interacțiunilor fizico-chimice care pot avea loc între particule diferite din fluid.

Indiferent de caracterizarea mecanică a fluidelor, corp continuu sau sistem de particule, proprietățile fizice ale fluidelor se bazează pe una din ipotezele de bază admisă în mecanica fluidelor, aceea potrivit căreia fluidele sunt medii perfect continui în structura lor, atât la nivel de corp continuu cât și la nivel de particulă. Ipoteza de continuitate a fluidului permite definirea proprietăților acestuia ca funcții continue atât în spațiu, prin coordonatele carteziane ( $x, y, z$ ), cât și în timp, prin coordonata temporală ( $t$ ).

De aceea, atât proprietățile fluidului cât și mărimile fizice care caracterizează proprietățile mediului în care se află fluidul se exprimă ca funcții continue de coordonate spațiale și de timp. Coordonatele spațiale pot fi carteziane, polare sau cilindrice. În cazul coordonatelor spațiale carteziane, se exprimă sub forma:

$$P = P(x, y, z, t)$$

unde  $P$  este proprietatea fluidului sau una din mărimile fizice care caracterizează mediul în care se află fluidul.

## Proprietățile fluidului

Proprietățile fizice cele mai utilizate ale fluidului sunt calculabile și măsurabile: compoziția, densitatea, viscozitatea, tensiunea superficială, căldura specifică, conductivitatea termică, conductibilitatea electrică, indicele de refracție și proprietăți magnetice. Alte proprietăți utilizate pentru fluide sunt calitative, precum: culoarea, gustul, mirosul, biodegradabilitatea. În studiul mecanicii fluidelor proprietățile utilizate sunt densitatea și viscozitatea pentru toate fluidele și tensiunea superficială numai pentru lichide.

Proprietățile fluidului sunt dependente **numai de natura fluidului**. Toate proprietățile fluidului sunt cuantificabile, inclusiv cele calitative, prin tehnicile moderne de măsurare a lungimilor de undă emise de atomii constituenți, a conductivității electrice și alte mărimi fizice, asistate de transpunerea digitală.

Pentru a putea compara mai multe fluide din punct de vedere a mărimii unei proprietăți fizice este necesar ca valoarea proprietății să fie exprimată **în aceeași unitate de măsură** pentru toate fluidele. Mărimile fizice fundamentale folosite în mecanică sunt lungimea (L), masa (M) și timpul (T). Unitățile de măsură corespunzătoare mărimilor fizice fundamentale sunt metrul, kilogramul și secunda, care stau la baza **sistemului internațional de unități, SI**. Mărimile fizice derivate sunt combinații între mărimile fundamentale, iar unitățile de măsură ale acestora sunt corespunzător combinații ale unităților fundamentale. În afara sistemului internațional se utilizează sisteme de unități tolerate, care au avantajul exprimării mărimilor fizice în valori mai ușor de perceput și reținut.

Mărimile fizice fundamentale au caracter extensiv și ca atare pot varia fără limită superioară, în timp ce mărimile fizice derivate au caracter intensiv fiind concepute pentru caracterizarea proprietăților substanțelor, în speță ale fluidelor.

**Densitatea**,  $\rho$ , reprezintă raportul dintre masă, M, și volum, V, reprezentând masă specifică. Relația de definiție a densității este:

$$\rho = \frac{M}{V}$$

$M$  este mărime fizică fundamentală (reprezintă masa)

Unitatea de măsură în sistemul internațional de unități pentru masă este:  $(M)_{SI} = kg$

$V = L^3$ , volumul este mărime fizică derivată, extensivă.

Unitatea de măsură în sistemul internațional de unități pentru volum este:  $(V)_{SI} = ((L)_{SI})^3 = m^3$

Unitatea de măsură în sistemul internațional pentru densitate rezultă din relația de definiție a acesteia:

$$\langle \rho \rangle_{SI} = \frac{\langle M \rangle_{SI}}{\langle V \rangle_{SI}} = \frac{kg}{m^3}$$

**Viscozitatea**,  $\eta$ , reprezintă raportul dintre efortul de forfecare  $\tau$  și gradientul de viteză  $dv/dx$  în mișcarea relativă a particulelor din interiorul fluidului. Acest raport este efortul de forfecare specific și reprezintă măsura frecărilor din interiorul fluidului, care acționează ca frână în mișcarea acestuia. Relația de definiție a viscozității:

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{dv}{dx}}$$

Această proprietate a fluidului se manifestă numai în mișcarea fluidului, de aceea studiul viscozității se va face în detaliu în capitolul de „Dinamica fluidelor”.

Efortul de forfecare se exprimă, la rândul lui, ca raport între forța  $F$  și aria de forfecare  $A$ , care este suprafața dintre două straturi de fluid care alunecă în raport unul cu altul sub efectul respectivei forțe. Relația de definiție a efortului de forfecare este:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Relația de definiție a forței este dată de legea a doua a lui Newton, care arată că forța de accelerare a unui corp este proporțională cu accelerația acestuia  $a$ , considerând masa constantă atât timp cât se păstrează integritatea corpului:

$$F = M \cdot a$$

Accelerația reprezintă derivata vitezei  $v$  în raport cu timpul, iar viteza reprezintă derivata spațiului în raport cu timpul, ca atare:

$$a = \frac{dv}{dt} \quad v = \frac{dx}{dt}$$

Prin exprimare în funcție de mărimile fizice fundamentale:

$$v = \frac{L}{T}$$

$$a = \frac{v}{T} = \frac{L}{T^2}$$

$$F = M \cdot \frac{L}{T^2}$$

$$A = L^2$$

$$\tau = \frac{M}{L \cdot T^2}$$

$$\frac{dv}{dx} = \frac{v}{L} = \frac{1}{T}$$

$$\eta = \frac{M}{L \cdot T}$$

Unitatea de măsură pentru viscozitate în sistemul internațional:

$$\langle \eta \rangle_{SI} = \frac{\langle M \rangle_{SI}}{\langle L \rangle_{SI} \cdot \langle T \rangle_{SI}} = \frac{kg}{m \cdot s}$$

O altă modalitate este de a exprima viscozitatea funcție de forță, ca mărime derivată și alte mărimi fundamentale.

$$\eta = \frac{\frac{F}{L^2}}{\frac{1}{T}} = \frac{F \cdot T}{L^2}$$

$$\langle \eta \rangle_{SI} = \frac{\langle F \rangle_{SI} \cdot \langle T \rangle_{SI}}{(\langle L \rangle_{SI})^2} = \frac{N \cdot s}{m^2} = Pa \cdot s$$

*Pa* este unitatea de măsură pentru presiune.

**Tensiunea superficială**,  $\sigma$ , este proprietatea generală a lichidelor de a lua formă geometrică de arie minimă în lipsa forțelor externe. Această proprietate de păstrare a formei compacte pentru lichide determină proprietatea de incompresibilitate a lichidelor, adică aceea de a prezenta volum constant. Forma geometrică a suprafeței de separare dintre lichidul considerat și altă fază adiacentă (lichid sau gaz) se datorează diferenței dintre forțele de coeziune între cele două faze.

Suprafața de separare a lichidului este întinsă de forțele de tensiune superficială care acționează la limita suprafeței astfel încât aceasta să aibă arie minimă. Valoarea acestor forțe,  $F$ , este direct proporțională cu perimetrul suprafeței de separare a lichidului (perimetrul reprezentând limita suprafeței),  $l$ , de unde și relația de definiție a tensiunii superficiale:

$$\sigma = \frac{F}{l}$$

Unitatea de măsură în sistemul internațional:

$$\langle \sigma \rangle_{SI} = \frac{\langle F \rangle_{SI}}{\langle l \rangle_{SI}} = \frac{N}{m}$$

Un efect interesant se produce la limita suprafeței libere de separare a lichidului cu suportul solid (perete). Datorită interacțiunii cu peretele, suprafața liberă a lichidului se curbează fie în sus fie în jos în imediata vecinătate cu acesta corespunzător unei atracții mai puternice respectiv mai slabe din partea moleculelor peretelui asupra moleculelor de lichid.

În Figura 1 molecula de lichid din margine este atrasă de perete cu o forță mai mare decât moleculele de lichid adiacente. Atracția mai mare din partea moleculelor peretelui solid determină o tendință de aglomerare de molecule de lichid în zona peretelui rezultând o forță de respingere între acestea cu efectul ridicării lichidului la perete. Efectul nu este observabil pentru suprafețe mari, dar este vizibil în tuburi de diametre foarte mici, comparabile cu dimensiunea moleculelor, numite *tuburi capilare*.

În Figura 2 situația este inversată, peretele exercitând o atracție relativ slabă în raport cu forța de coeziune în lichid. Datorită inegalității de forțe, moleculele de lichid tind să se depărteze de perete. Rarefierea moleculelor de lichid din zona peretelui implică forțe de atracție între acestea cu efectul coborârii lichidului la perete. Efectul de curbare a suprafeței lichidului în sensul depărtării de perete este vizibil în tuburile capilare.

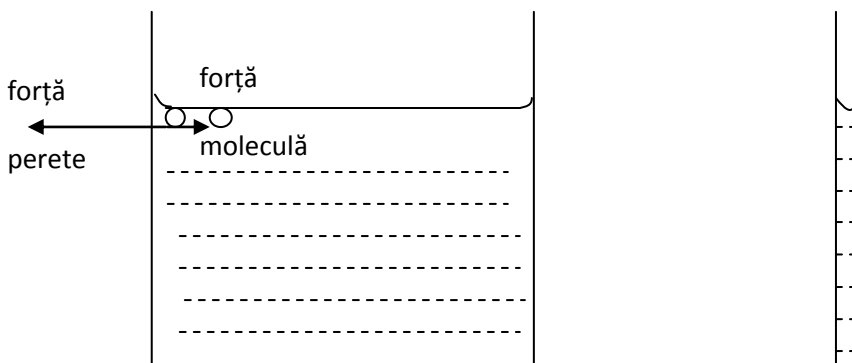


Figura 1 Interacțiunea lichidului cu peretele în sensul udării peretelui.

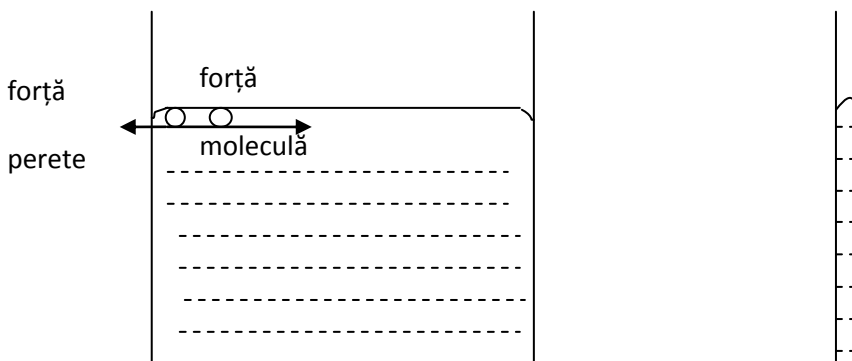


Figura 2. Interacțiunea lichidului cu peretele în sensul uscării peretelui.

## Mărimi fizice fundamentale și sisteme de unități de măsură

Sunt de interes mărimile fizice din domeniul mecanicii, care sunt folosite și în toate celelalte domenii ale fizicii și tehnicii împreună cu mărimi fizice specifice domeniului respectiv. Pentru disciplina de „Mecanica fluidelor” se vor prezenta numai mărimile de natură mecanică.

Mărimile fizice fundamentale sunt:

- Lungimea, L
- Masa, M
- Timpul,  $\tau$

Unitățile de măsură fundamentale corespunzătoare acestor mărimi fizice sunt definite:

- Metrul a fost ales ca lungimea care reprezintă a 40.000.000-a parte din lungimea meridianului care trece prin Greenwich. Lungimea meridianelor nu este riguros egală pe suprafața planetei, chiar dacă variațiile s-au dovedit a fi de ordinul 0,02%, adică 0,2 mm la 1 m. Metrul reprezintă, de asemenea, lungimea unui pendul gravitațional cu perioada de oscilație de 2 secunde, dar această lungime nu poate fi determinată riguros datorită unei foarte ușoare variații a accelerației gravitaționale. Măsurarea lungimii etalon de 1 metru a fost realizată după 1791, considerând un anumit meridian, a fost transpusă pe o bară dintr-un aliaj de platină și se păstrează la Sèvres, lângă Paris. În 1960, etalonul de lungime a devenit egal cu  $1.650.763,63$  lungimi de undă în vid ale radiației care corespunde tranziției între nivelele  $2p^{10}$  și  $5d^5$  ale atomului de kripton cu masa moleculară 86. Din 1983, metrul etalon a devenit lungimea parcursă de lumină în intervalul de  $1/299.792.458$  dintr-o secundă.
- Kilogramul reprezintă masa unui corp etalon, prototip de platină iridiată, păstrat și acesta la Sèvres
- Secunda a fost stabilită ca o fracțiune din durata anului măsurată la tropic. Anul măsurat se consideră încheiat când Pământul revine la aceeași poziție și aceeași tendință relativă de mișcare față de Soare, măsurată la tropic. Un