

Mișcarea în conducte

Mișcarea laminară

Curgerea permanentă în conductele circulare ale transmisiilor hidraulice este frecvent laminară, deoarece lichidele funcționale au o vâscozitate relativ mare, diametrele conductelor sunt relativ mici, iar vitezele medii nu depășesc uzual 5 m/s în scopul limitării șocurilor hidraulice provocate de elementele de distribuție, reglare și protecție. Se consideră o conductă circulară dreaptă orizontală, având diametrul D și lungimea L , alimentată la presiune constantă, p_0 , de un rezervor, printr-un confuzor continuu. La intrarea în conductă distribuția vitezei este practic dreaptă, $v = v_0$ (fig.1).

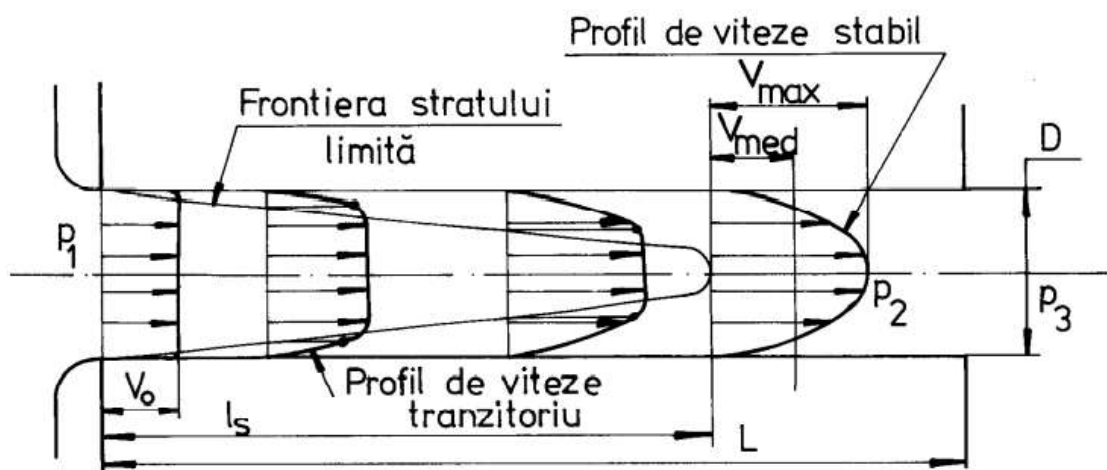


Fig. 1 Distribuția vitezei în mișcarea laminară a unui fluid într-o conductă circulară dreaptă

Datorită aderenței lichidului la pereții conductei și vâscozității, distribuția vitezei se modifică continuu, pe măsură ce lichidul pătrunde în conductă. Grosimea stratului de lichid în care are loc variația vitezei (stratul limită) crește până când acesta atinge axul conductei, rezultând o distribuție parabolică (Hagen-Poiseuille) a vitezei, care se menține constantă de-a lungul conductei, până la intrarea în rezervorul aval, unde presiunea este menținută constantă, p_2 .

Pentru un profil parabolic, viteza maximă are valoarea $v_{\max} = 2v_{\text{med}} = 2v_0$, deci pe lungimea de stabilizare a profilului vitezei, l_s , raportul $v_{\max}/v_{\text{med}}$ variază între 1 și 2. În imaginea 2 se prezintă variația mărimilor adimensionale ($v_{\max}/v_{\text{med}}$) și $2(p_0 - p_2) / (\rho v_{\text{med}}^2)$ în funcție de mărimea adimensională $L / (D \cdot \text{Re})$.

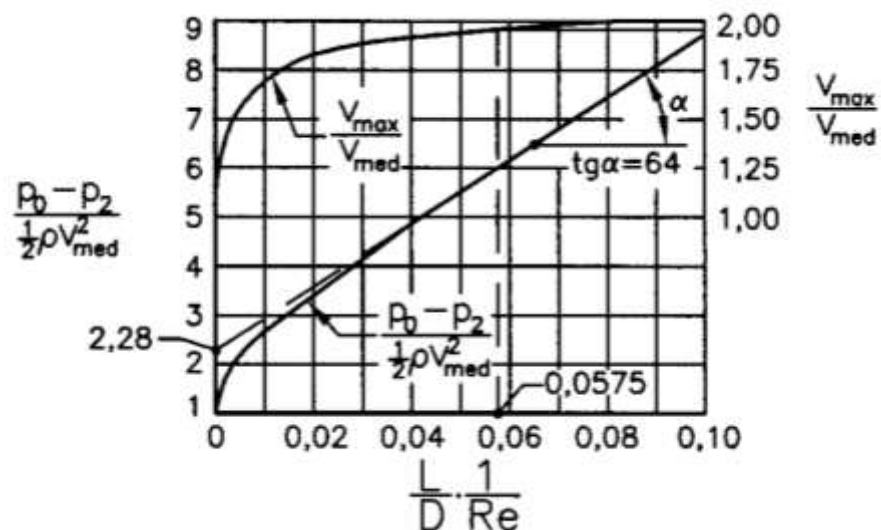


Fig. 2 Variația parametrilor cinematici și dinamici adimensionali ai mișcării laminare în funcție de numărul $L/(D \cdot Re)$

Dacă se admite că lungimea de stabilizare corespunde secțiunii în care viteza maximă este cu 1% mai mică decât viteza maximă finală, ($v_{max}/v_{med} = 1,98$) din grafic rezultă:

$$l_s = 0,0575 \cdot D \cdot Re$$

La limita superioară a mișcării laminare ($Re = 2000$) este necesară o lungime de 115 diametre de conductă pentru stabilirea profilului de viteze parabolic. Căderea de presiune în regiunea de tranziție este generată atât de forțele de inerție cât și de forțele de vîscozitate. Pentru conducte mai mici decât lungimea de stabilizare, căderea de presiune relativă poate fi aproximată cu relația lui Langhaar:

$$\frac{p_0 - p_2}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{med}^2} = 64 \frac{L}{D \cdot Re} + 2,28$$

Deci:

$$p_0 - p_2 = \frac{128 \cdot \eta \cdot L \cdot Q}{\pi \cdot D^4} \left(1 + 0,0356 \frac{D \cdot Re}{L} \right)$$

Primul termen corespunde forțelor de viscozitate (relația Hagen-Poiseuille), iar al doilea - forțelor de inerție ale stratelor care sunt accelerate pe lungimea de tranziție. Dacă muchia de intrare în conductă este ascutită, coeficientul pierderii de sarcină locale are valoarea $\zeta = 0,5$, deci ultima relație devine:

$$p_0 - p_3 = \frac{128 \cdot \eta \cdot L \cdot Q}{\pi \cdot D^4} \left(1 + 0,0434 \frac{D \cdot Re}{L} \right)$$

În cazul conductelor circulare scurte, având intrarea și ieșirea bruște, se poate utiliza relația lui Shapiro, Siegel și Keine:

$$p_0 - p_3 = \frac{\rho}{2} v_{med}^2 \left(1,5 + 13,74 \sqrt{\frac{L}{D \cdot Re}} \right)$$

valabilă pentru $L / (D \cdot Re) \leq 0,001$.

Liniaritatea relației dintre debit și căderea de presiune, caracteristică tuturor mișcărilor laminare, este foarte utilă în calculul circuitelor hidraulice. Conductele circulare drepte având un diametru redus, denumite uzual "tuburi capilare", sunt frecvent utilizate pentru mărirea rigidității lagărelor hidrostatice, în stabilizarea elementelor de reglare a presiunii și debitului, pentru amortizarea oscilațiilor motoarelor hidraulice volumice etc. Totuși, mișcarea laminară este sensibilă la variațiile de temperatură, care modifică vâscozitatea lichidelor. Acest dezavantaj poate fi esențial în unele aplicații și nu poate fi evitat decât prin termostatarea sistemului. O regulă practică pentru dimensionarea tuburilor capilare este $L/D \geq 400$. Totuși, rapoarte mult mai mici sunt satisfăcătoare la numere Reynolds mici, specifice îndeosebi curgerilor alternative de frecvență mare.

Tuburile capilare pot fi realizate și prin introducerea presată a unui șurub cu profil triunghiular sau dreptunghiular într-o bucă cilindrică circulară. Raza de dispunere a canalului astfel format este mult mai mare decât dimensiunea sa caracteristică, permițând calculul pierderii de presiune corespunzătoare cu ajutorul relațiilor stabilite pentru tuburile drepte. Astfel, în cazul unei conducte cu secțiunea dreptunghiulară, de lățime b și înălțime h , ($b \geq h$):

$$Q = \frac{b \cdot h^3}{12 \cdot \eta \cdot L} \cdot \left(1 - \frac{192 \cdot h}{\pi^5 \cdot b} \operatorname{th} \frac{\pi \cdot b}{2 \cdot h} \right) \cdot (p_1 - p_2)$$

Dacă $b = h$ (conductă pătrată):

$$Q = \frac{b^4}{28,4 \cdot \eta \cdot L} \cdot (p_1 - p_2)$$

Pentru o conductă având secțiunea de forma unui triunghi echilateral cu latura b :

$$Q = \frac{b^4}{185 \cdot \eta \cdot L} \cdot (p_1 - p_2)$$

În aceste relații L reprezintă lungimea conductei drepte sau lungimea desfășurată a tubului curbat. Evaluarea regimului de curgere prin conducte cu secțiuni necirculare se face pe baza diametrului hidraulic, dar trebuie considerată aproximativă. În cazul sistemelor importante sunt necesare verificări experimentale sistematice.

Observație. Legea Hagen-Poiseuille este stabilită și se verifică experimental în cazul curgerii laminare izoterme; curgerile tehnice se realizează cu variații de temperatură datorită cărora coeficientul pierderilor de sarcină liniare variază practic în intervalul:

$$\frac{64}{Re} \leq \lambda \leq \frac{75}{Re}$$

Mișcarea turbulentă

Modelul curgerii turbulente în conducte și ecuațiile corespunzătoare se bazează în mare măsură pe observații experimentale. La intrarea într-o conductă circulară (fig. 3) stratul limită este laminar, dar devine turbulent la mică distanță, cu excepția unui substrat laminar subțire. Grosimea stratului limită turbulent crește spre centrul conductei pe o lungime de stabilizare (tranziție) cuprinsă între 25 și 40 de diametre; se stabilește o distribuție de viteze aplatizată ($v_{\max} \cong 1,2 \cdot v_{\text{med}}$), care se menține pe toată lungimea conductei. Căderea de presiune poate fi evaluată cu relația echivalentă a lui Darcy:

$$p_1 - p_2 = \lambda \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{L}{D} v_{med}^2$$

coeficientul pierderilor de sarcină liniare, λ , depinzând de numărul Re și de rugozitatea pereților conductei.

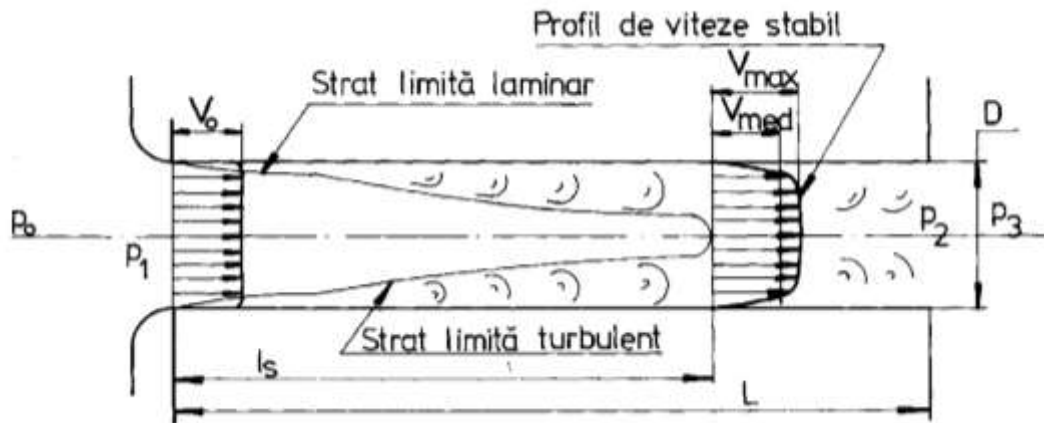


Fig. 3 Distribuția vitezei în mișcarea turbulentă a unui fluid într-o conductă circulară dreaptă

Conductele metalice întrebuințate în transmisiile hidraulice sunt executate din oțeluri carbon sau inoxidabile, trase la cald sau la rece, au frecvent caracteristici geometrice și mecanice garantate și sunt supuse unor operații complexe, mecanice și chimice, de îndepărtare a oxizilor formați în cursul laminării și prelucrărilor ulterioare (tăiere, îndoire, sudare). Rugozitatea astfel obținută este relativ mică și nu crește în timp, deci din punct de vedere hidraulic conductele transmisiilor hidraulice pot fi considerate "netede". Coeficientul λ se poate calcula cu relația lui Blasius:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$$

valabilă pentru $4 \cdot 10^3 < Re < 10^5$ sau cu relația lui Prandtl-Kármán:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \lg Re \sqrt{\lambda} - 0,8$$

utilizabilă în domeniul $3 \cdot 10^3 < Re < 10^7$.

În imaginea 4 sunt reprezentate în coordonate logaritmice curbele $\Delta p/L(Q)$ pentru câteva diametre uzuale de conductă, conform relațiilor Hagen-Poiseuille și Blasius. S-a considerat un ulei mineral cu densitatea $\rho = 905 \text{ kg/cm}^3$ și viscozitatea $\nu = 30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (H30).

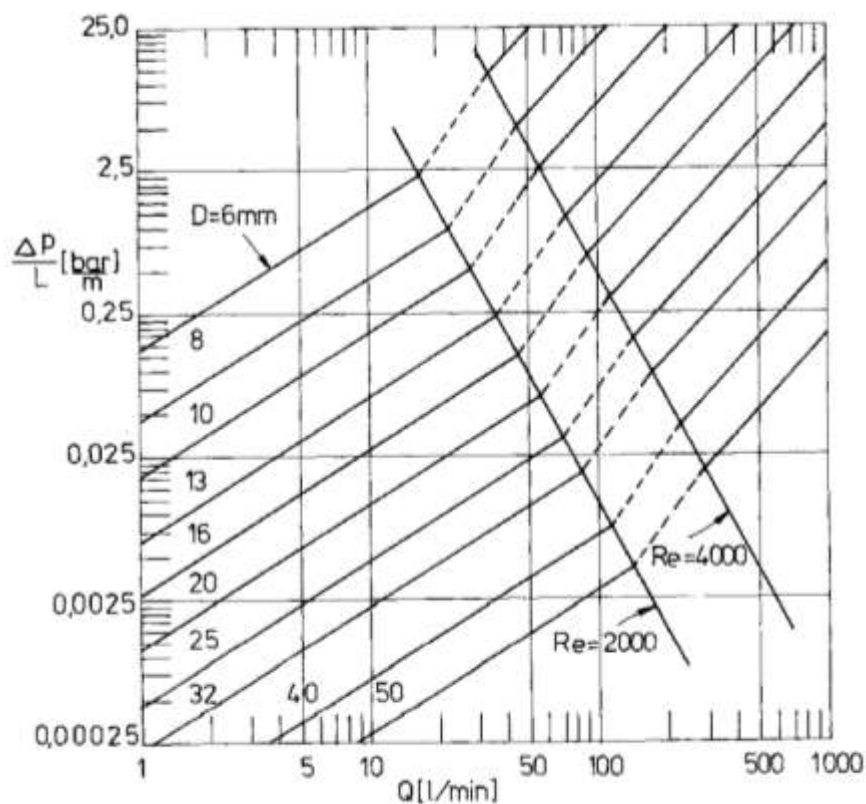


Fig. 4 Variația căderii de presiune specifice în funcție de debit pentru conductele uzuale ale transmisiilor hidraulice

Diagrama evidențiază creșterea gradientului presiunii în regiunea curgerii turbulente față de regiunea curgerii laminare. Deci, este de dorit ca mișcarea să fie laminară, dar această condiție conduce uzual la diametre mari. Căderea de presiune specifică admisă curent este de circa 0,25 bar/m. Pierderile de presiune generate de mișcările turbulente în conductele de secțiune necirculară pot fi evaluate cu relația lui Darcy, înlocuind diametrul geometric cu cel hidraulic. În calcule aproximative se poate considera $\lambda \cong 0,025$.