

Figura 5.1

$$\rho \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x} = F_{\text{mas}(x)} + F_{\text{pres}(x)} + F_{\text{elast}(x)} + F_{\text{vasc}(x)} \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (5.2)$$

$$? = ?(p, T) \text{ sau } p = p(? , T) \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_x}{\partial y}; \quad \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial \tau_z}{\partial y} \quad (5.4)$$

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dn} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \eta \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} \right); \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \eta \cdot \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \quad (5.6)$$

$$\text{iar pentru } \eta = \text{ct. pe directia } y \quad \frac{\partial p}{\partial x} = \eta \cdot \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2}; \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial p}{\partial z} = \eta \cdot \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (5.8)$$

În cazul interstitiului convergent din figura 5.1 se admit si urmatoarele conditii limita:

- cinematice: la  $y = 0$ :  $v_x = 0$ ;  $v_y = v_z = 0$  si la  $y = h$ :  $v_x = v$ ;  $v_y = v_z = 0$ ; (5.9)

- de presiune: la  $x = 0$ :  $p = 0$  si la  $z = \pm B/2$ :  $p = 0$ ;

- termice: la  $x = 0$ :  $T = T_0$  si la  $y = h$ :  $T = T_h$ .

$$v_x = -\frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot y \cdot (h - y) + \frac{v}{h} \cdot (h - y) \quad (5.10)$$

$$v_y = 0$$

$$v_z = -\frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \cdot y \cdot (h - y)$$

$$\text{Daca } q_{1x} = \int_0^h v_x dy \cdot 1 \text{ si } q_{1z} = \int_0^h v_z dy \cdot 1, \text{ atunci } q_{1x} = -\frac{h^3}{12 \cdot \eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{v \cdot h}{2}; \quad q_{1z} = -\frac{h^3}{12 \cdot \eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \quad (5.11)$$

$$\frac{\partial q_{1x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{1z}}{\partial z} = 0 \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h^3}{12 \cdot \eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{h^3}{12 \cdot \eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{v}{2} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \quad (5.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \cdot \eta \cdot v \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \quad (5.14)$$

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{12 \cdot \eta}{h^3} \cdot \left( q_{1x} + \frac{v_x \cdot h}{2} \right) \quad (5.15)$$

Daca, în punctul în care presiunea fluidului are o valoare maxima ( $p_{\text{max}}$ ), se noteaza cu  $h_m^*$  grosimea peliculei (figura 5.1)

si  $dp/dx = 0$ , va rezulta  $h_m^* = -\frac{2}{v} q_{1x}$  si din (5.10)  $v_x = -v \left( 1 - \frac{y}{h} \right)$ , deci o variatie liniara a vitezei în raport cu  $y$ . Astfel, (5.16)

se poate obtine o varianta si mai simpla a ecuatiei diferentiale a presiunilor  $\frac{dp}{dx} = 6 \cdot \eta \cdot v \cdot \left( \frac{h_m^* - h}{h^3} \right)$

Pentru interstiul sub forma de pana din figura 5.1. rezulta expresia  $p_x = 6\eta \cdot v \cdot \int_0^x \frac{h_m^* - h}{h^3} dx$  (5.17)

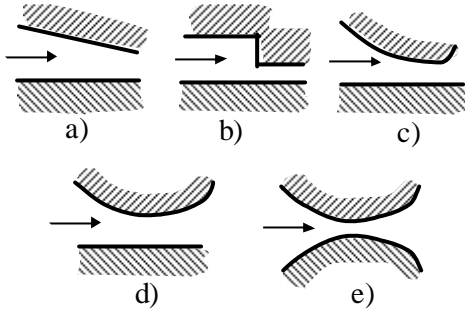


Figura 5.3

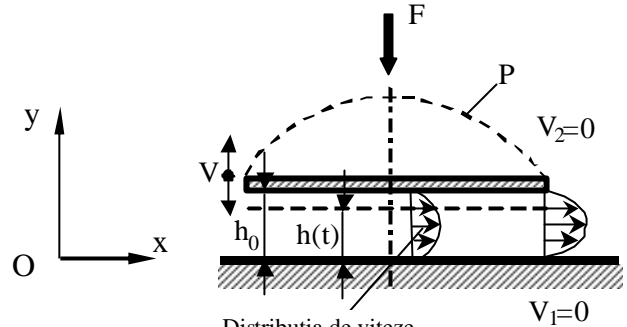


Figura 5.4

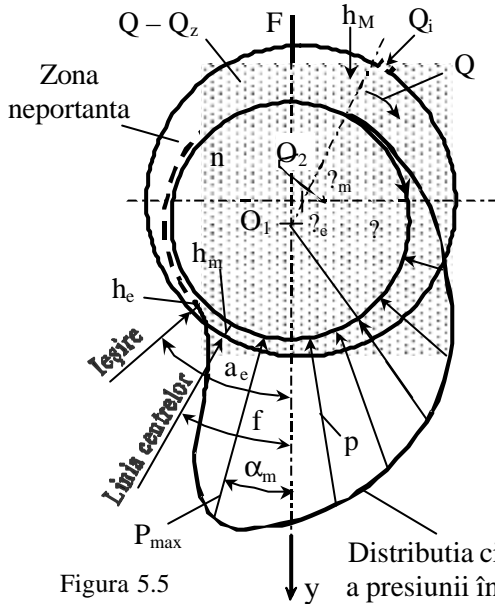
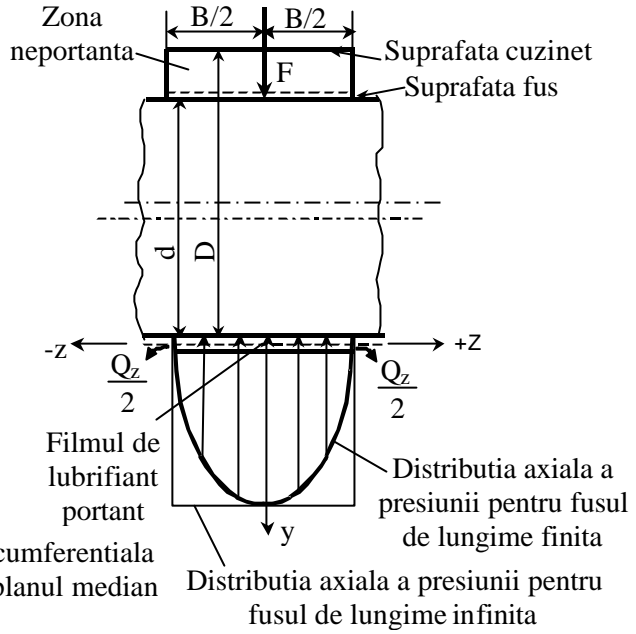


Figura 5.5



$$\frac{d}{dx} \left( h^3 - \frac{dp}{dx} \right) = 12 \cdot \eta \cdot v_y \quad (5.18)$$

$$h = \frac{J}{2} + e \cdot \cos\theta \text{ unde } \frac{J}{2} = e + h_m. \quad (5.19)$$

$$\varepsilon + \delta = 1 \quad (5.20)$$

$$h = 1 + \varepsilon \cdot \cos\theta \quad (5.21)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ (1 + \varepsilon \cdot \cos\theta)^3 \cdot \frac{\partial \bar{p}}{\partial \theta} \right] + \left( \frac{B}{D} \right)^2 \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left[ (1 + \varepsilon \cdot \cos\theta)^3 \cdot \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} \right] = 12 \cdot \pi \cdot \eta \cdot \frac{\partial(1 + \varepsilon \cdot \cos\theta)}{\partial \theta} \text{ unde } \bar{x} = \theta; \bar{z} = \frac{2z}{B}; \bar{p} = \frac{p \cdot \Psi^2}{\eta \cdot n}. \quad (5.22)$$

$$F_p = \sqrt{F_{ie}^2 + F_{ip}^2} = F_r \quad (5.23)$$

$$F_p = \frac{\eta \cdot \omega}{\Psi^2} \cdot B \cdot D \cdot S_o \quad (5.24)$$

$$\varphi = \arctg \frac{F_{ip}}{F_{ie}} \quad (5.25)$$

$$c_p = \frac{\eta \cdot n}{p_m \cdot \Psi^2} = \frac{1}{S_o} \quad (5.26)$$

$$c_q = \frac{Q}{D^2 \cdot B \cdot \Psi \cdot n} = f_2(c_p, B/D) \quad (5.27)$$

$$c_{qz} = \frac{Q_z}{D^2 \cdot B \cdot \Psi \cdot n} = f_3(c_p, B/D) \quad (5.28)$$

$$c_f = \frac{\mu_f}{\Psi} = \frac{P_f}{\pi \cdot F_r \cdot D \cdot n \cdot \Psi} = f_4(c_p, B/D) \quad (5.29)$$

$$h_{mad} = K_m \cdot (R_{max \text{ fus}} + R_{max \text{ cuzinet}}) \quad (5.30)$$

$$h_m = \delta \cdot \Psi \cdot \frac{D}{2} \quad (5.31)$$

$$P_f = P_c + P_a + P_l \quad (5.32)$$

$$P_f = K \cdot A_e (t - t_0) + Q_s \cdot \rho_l \cdot c_l (t_e + t_i) \quad (5.33)$$

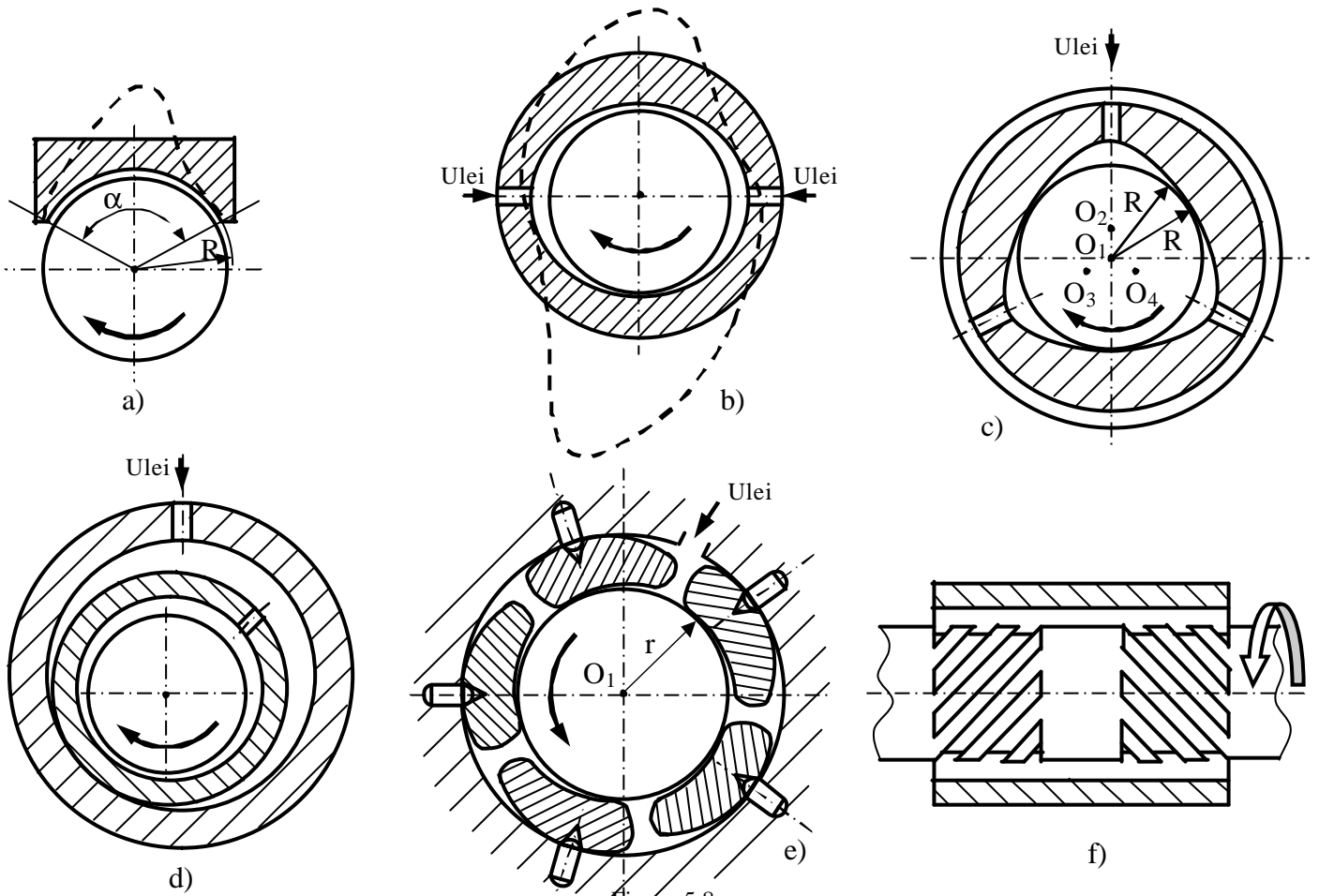


Figura 5.8

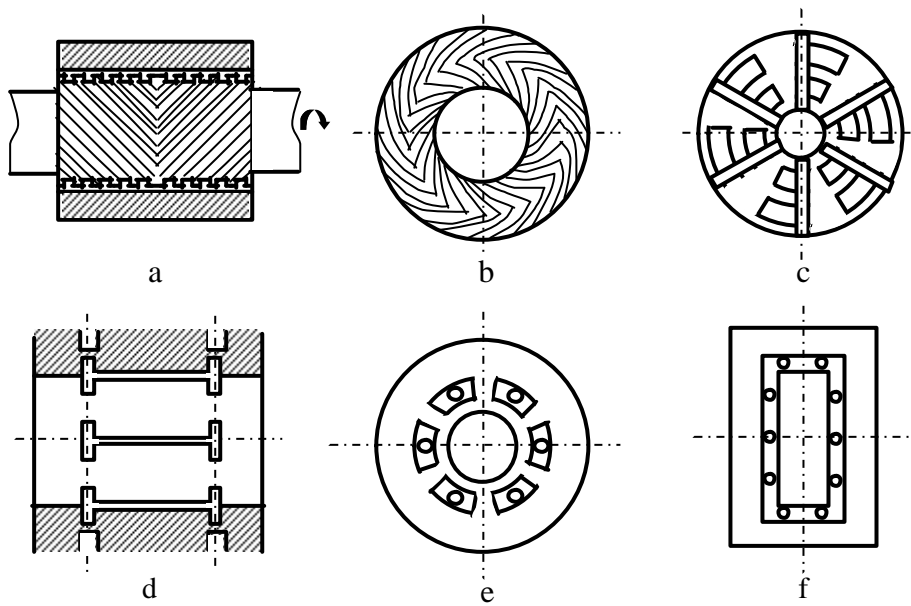


Figura 5.9

Dupa Drescher [1], pâna la maximum  $5 \cdot 10^4$  rot/min, se poate utiliza expresia  $p_m [10^{-1} \text{ MPa}] \approx 10^{-4} [\text{rot/min}]$

$$(5.34)$$

Deoarece  $p_m = F/(B \cdot D)$ , se recomanda  $B/D = 1,5 \dots 2$  si  $\psi = 0,5 \dots 1,5 \text{ ‰}$ .

Presiunea medie astfel obtinuta se limiteaza la valori de maximum  $1 \pm 1,5 \cdot 10^{-1}$  MPa.

$$F \approx \frac{p^* \cdot B \cdot D}{4} \quad (5.35)$$

$$H_s = \frac{6 \cdot n \cdot ? \cdot r_0^2 \cdot \sqrt{R \cdot T}}{p_{al} \cdot h^3 \cdot \sqrt{1+d^2}} \quad (5.36)$$

$$\bar{F} = \frac{F}{L \cdot B \cdot (p_{al} - p_e)}; \bar{k} = \frac{1+\delta^2}{1+\frac{2}{3}\delta^2} \cdot \frac{h \cdot k}{L \cdot B \cdot (p_{al} - p_e)} \quad (5.37)$$

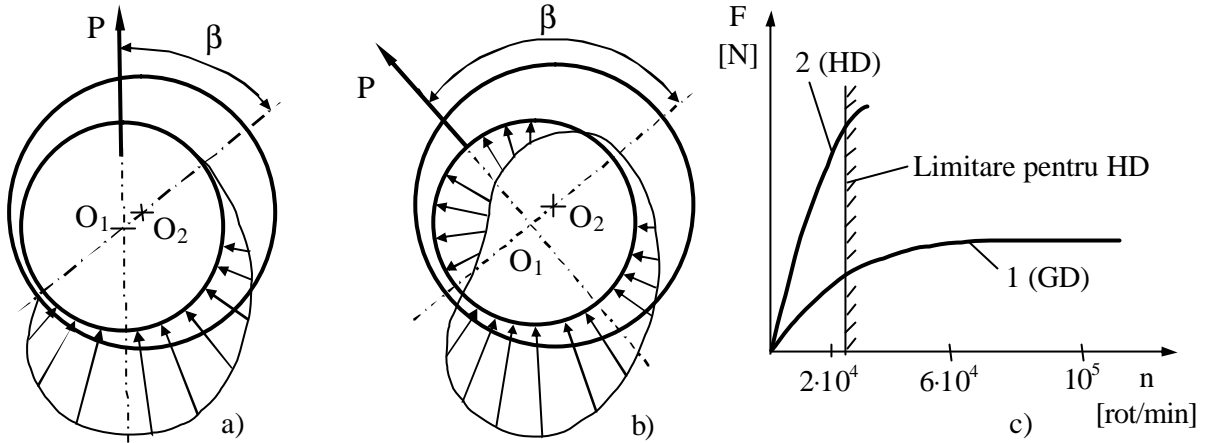


Figura 5.10

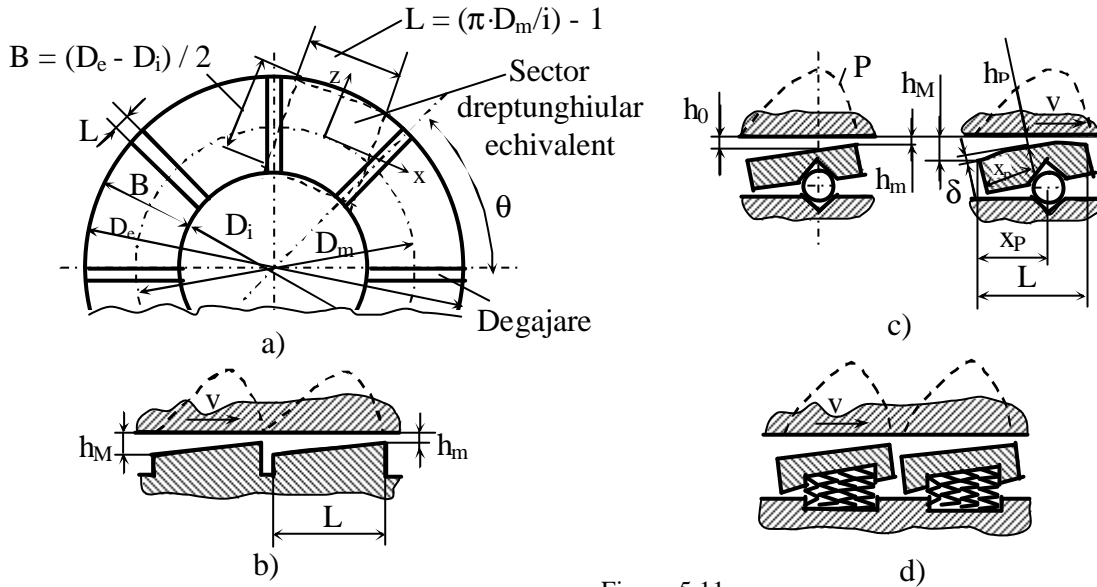


Figura 5.11

$$p_m = \frac{F_a}{i \cdot L \cdot B} = \frac{F_a}{\pi \cdot D_m \cdot \phi \cdot B} \quad (5.38)$$

$$\frac{dp}{dx} = 6\eta \cdot v \cdot \left( \frac{h'_m}{h^3} \right) \quad (5.39)$$

- coeficientul de portanta:  $c_{px} = \frac{\eta \cdot v \cdot L}{p_m \cdot h^2} = f_1 \left( \frac{h_M}{h_m}, \frac{B}{L} \right);$

- coeficientul de debit de iesire circumferential:  $c'_{qxs} = \frac{Q_{xs}}{v \cdot B \cdot h_m} = f_2 \left( \frac{h_M}{h_m}, \frac{B}{L} \right);$

- coeficientul de debit de intrare lateral:  $c'_{qzs} = \frac{Q_{zs}}{v \cdot B \cdot h_m} = f_3 \left( \frac{h_M}{h_m}, \frac{B}{L} \right);$

- coeficientul puterii consumate:  $c_{fx} = \frac{F_f \cdot L}{v \cdot F_{as} \cdot h_m} = f_4 \left( \frac{h_M}{h_m}, \frac{B}{L} \right).$

Pentru sectoarele inelare mai sunt necesare înca doua elemente:

- pozitia relativa a punctului de pivotare:  $\frac{x_p}{L} = f_5 \left( \frac{h_M}{h_m}, \frac{B}{L} \right);$

- grosimea relativa a filmului în dreptul punctului de pivotare:  $\frac{h_p}{h_m} = f_6 \left( \frac{h_M}{h_m}, \frac{B}{L} \right)$ .

$$P_f = K \cdot A_c \cdot (t - t_0) + (Q_x + Q_z) \cdot \rho_e \cdot c_e \cdot (t_e - t_i) \quad (5.40)$$

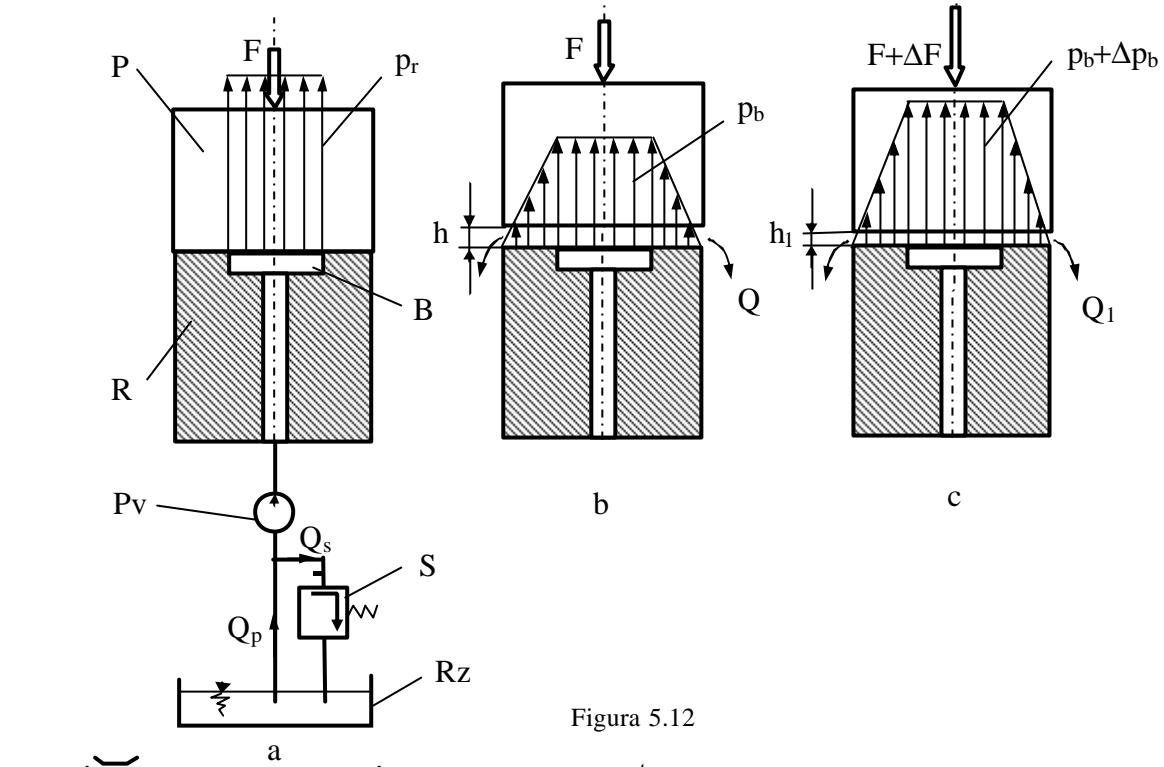


Figura 5.12

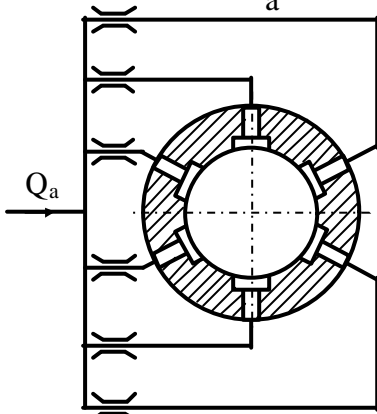


Figura 5.13.a

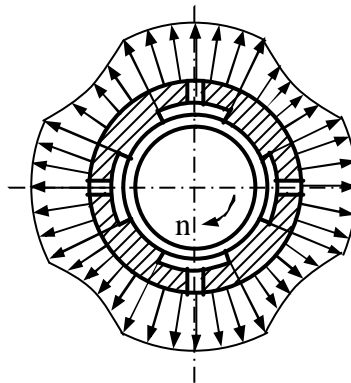


Figura 5.13.b

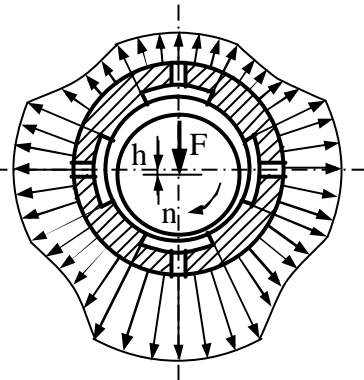


Figura 5.13.c

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \right) = 0 \quad (5.41)$$

$$F = p_r \cdot A_b = p_b \cdot A_t \cdot a_f \quad (5.42)$$

$$a_f = \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{1 - \left( \frac{D_b}{D} \right)^2}{\ln \frac{D_b}{D}} \right] \quad (5.43)$$

$$Q = a_q \cdot \left( \frac{F}{A_t} \right) \cdot \frac{h^3}{\eta} \quad (5.44)$$

$$a_q = \frac{\pi}{3} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{1 - \left( \frac{D_b}{D} \right)} \right] \quad (5.45)$$

$$P_p = p_b \cdot Q = a_p \cdot \left( \frac{F}{A_t} \right)^2 \cdot \frac{h^3}{\eta} \text{ iar } a_p = \frac{a_q}{a_f} \quad (5.46)$$

$$P_f = \frac{\pi}{64} \cdot \eta \cdot \frac{\omega^2}{h_m} \cdot (D^2 - D_b^2) \cdot (D + D_b)^2 \quad (5.48)$$

$$P_t = P_p + P_f \quad (5.49)$$

$$P \approx P_f = Q \cdot \rho_e \cdot c_e (t_e - t_i) \quad (5.50)$$

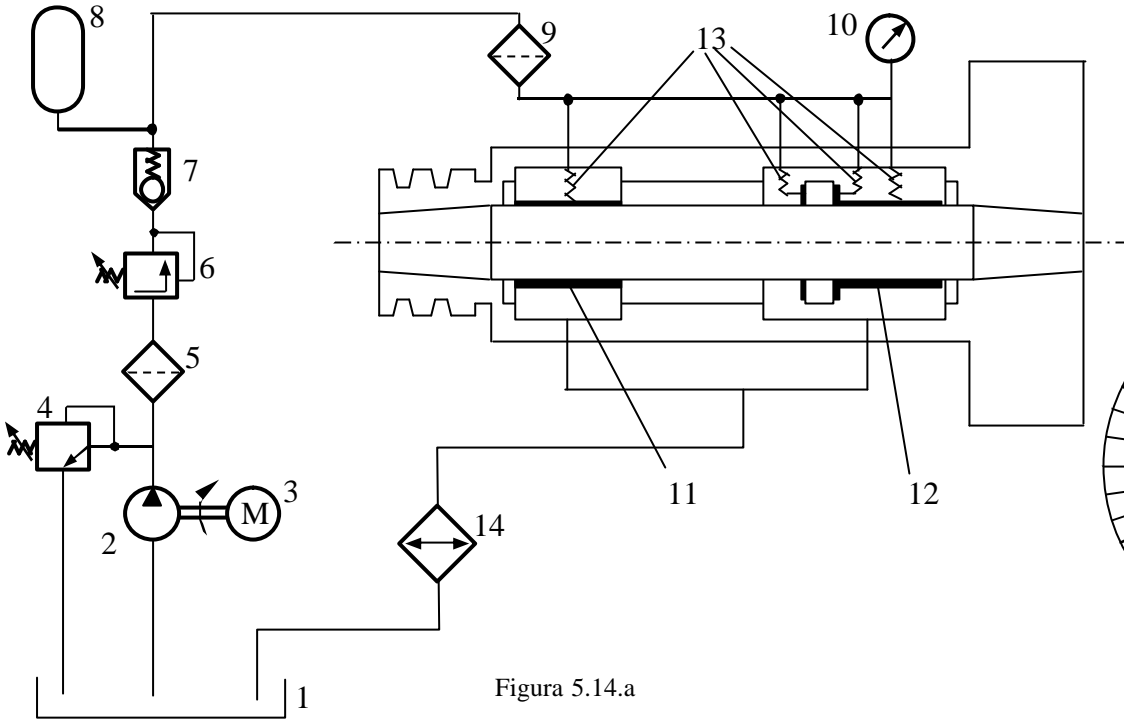


Figura 5.14.a

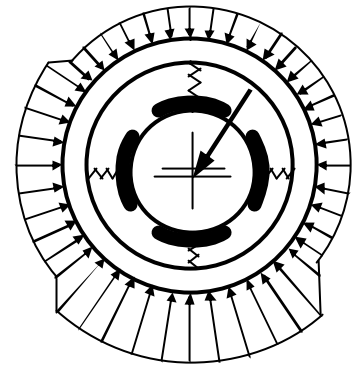


Figura 5.14.b

$$M_{i \max} = F_r \cdot \frac{B}{2} = \frac{\pi}{32} \cdot d^3 \cdot \sigma_{ai} \approx 0,1 \cdot d^3 \cdot \sigma_{ai} \quad (5.51)$$

$$d \approx \sqrt[3]{\frac{F}{0,2 \cdot \sigma_{aiIII}} \cdot \frac{B}{D}} \quad (5.52)$$

$$d \approx \sqrt[3]{\frac{F}{0,2 \cdot (1 - \beta^2)} \cdot \sigma_{aiIII}} \cdot \frac{B}{D} \quad (5.53)$$

$$c_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{k_\sigma \cdot \sigma_r} \geq c_a \quad (5.54)$$

$$d \approx \sqrt[3]{\frac{M_t}{0,2 \cdot \tau_{at}}} \quad (5.55)$$

$$d \approx \sqrt[3]{\frac{M_t}{0,1 \cdot \sigma_{ai}}} \quad (5.56)$$

$$F_r = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} p_m \cdot B' \cdot \frac{D}{2} \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha \approx p_m \cdot B \cdot D \quad (5.57)$$

$$\text{si deci } p_m \approx \frac{F_r}{B \cdot D} \text{ fiind necesar ca } p_m \leq p_a \quad (5.57')$$

$$p_{\max} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{F_r}{B \cdot D} \approx 1,27 \cdot p_m \quad (5.58)$$

$$p_m \cdot v \leq (p_m \cdot v)_{\text{adm}} \quad (5.59)$$

$$P_{\text{spf}} = \frac{\mu_{ak} \cdot F_r \cdot v}{B \cdot D} = \mu_{ak} \cdot p_m \cdot v \quad (5.60)$$

$$P_f = K \cdot A \cdot (t_m - t_0) \quad (5.61)$$

$$t_m = \frac{P_f}{K \cdot A} + t_0 \leq (t_m)_{\text{adm}} \quad (5.62)$$

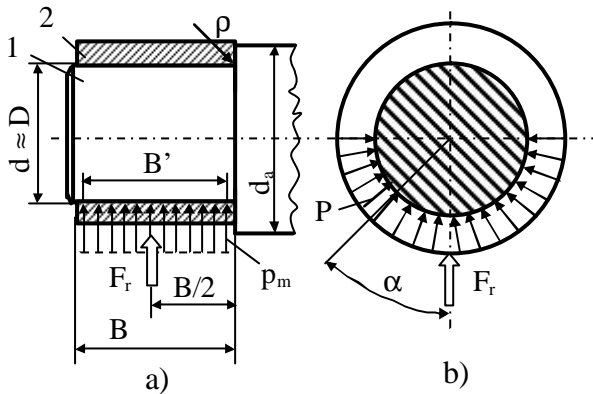


Figura 5.15

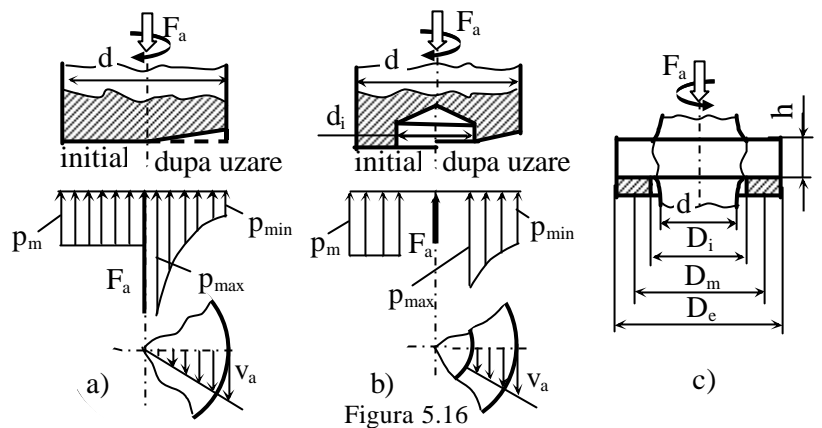


Figura 5.16

$$p_m = \frac{4 \cdot F_a}{\pi \cdot (D_e^2 - D_i^2)} \leq p_a \quad (5.63)$$

$$\sigma_i = \frac{3 \cdot F_a \cdot (D_m - d)}{\pi \cdot d \cdot h^2} \leq \sigma_{iad} \text{ unde } D_m = (D_e + D_i)/2 \text{ este diametrul mediu.} \quad (5.64)$$

### 5.11 Materiale pentru lagare

Datorita modului specific de functionare, o atentie deosebita trebuie acordata la alegerea cuplului de materiale pentru fus-cuzinet. Celelalte piese componente ale lagarului se executa din materiale obisnuite în practica industrială: fonte, oteluri.

#### 5.11.1 Materiale pentru fusuri

Fusul se executa de regula din acelasi material identic cu al arborelui sau al osiei. Materialul trebuie sa satisfaca atât conditiile generale de rezistenta mecanica, cât si cele specifice: rezistenta ridicata la uzura, rugozitate mica. Se prefera ca, în cazul ungerii defectuoase, sa se uzeze cuzinetul care este mai ieftin si mai usor de înlocuit. De aceea, pentru fusuri, se foloseste otel carbon de cementare sau îmbunatatire (cu duritate de 3 ... 5 ori mai mare decât a cuzinetului). Fusul se rectifică (1 ... 2 μm) astfel ca rugozitatea sa fie mult mai mica decât grosimea minima a filmului de lubrifiant. La sarcini mari, fusurile se trateaza termic (durificare superficială), dupa care se rectifică.

#### 5.11.2 Materiale antifricțiune pentru cuzineti

Materialul trebuie sa satisfaca conditiile de buna functionare chiar si atunci când apar conditii nefavorabile de exploatare care pot duce la contactul direct fus-cuzinet:

- ungerea saraca de la pornirea sau oprirea masinilor;
- suprasarcini accidentale si/sau functionare cu socuri;
- prezenta impuritatilor în lubrifiant;
- folosirea unui lubrifiant necorespunzator.

La alegerea cuplului de materiale antifricțiune trebuie sa se tina cont si de solutia constructiva adoptata pentru lagar: cuzinet dintr-o bucata cu piesa de care apartine, cuzinet realizat cu strat de material de antifricțiune (turnat, placat sau asamblat), fus cu material de antifricțiune (placat sau turnat).

Materialele pentru cuzineti trebuie sa aiba calitati mecano-tribologice, termice, tehnologice si economice.

Principalele calitati mecano-tribologice ale materialelor cuzinetilor sunt:

- buna compatibilitate cu materialul fusului, pentru evitarea gripajului;
- materialul sa permita aderența uleiului;
- conformitate buna cu materialul fusului (necesara în special la rodaj);
- coeficient redus de frecare cu fusul (chiar fara ungere!);
- sa adere bine la corpul (suport) cuzinetului;
- rezistenta superioara la uzare;
- sa reziste la strivire si la socuri.

Calitatile termice sunt:

- conductivitate termica ridicata, pentru evacuarea eficienta a caldurii;
- coeficient de dilatare termica redus sau apropiat cu cel al fusului;
- rezistenta termica ridicata.

Calitatile tehnologice impun cuzinetilor sa poata fi fabricati usor, prin prelucrari uzuale: turnare, forjare, aschiere, rectificare.

Principala conditie economica este ca piesa finala sa fie ieftina.

Principalele materiale folosite la constructia cuzinetilor sunt:

- *Fonta cenusie* Fc15, Fc20. Fonta este ieftina, dar nu suporta socuri. Se foloseste la cuzineti masivi, nu se preteaza la turatii mari, necesita ungere bogata; utilizari minore (actionari manuale);
- *Fonta cenusie antifricțiune* Fc A - 1, - 2, - 3. Prezinta un coeficient de frecare redus cu otelul, dar cere ca fusul sa fie durificat.
- *Fonta cu grafit nodular antifricțiune* Fgn A - 1, - 2. Poate înlocui bronzul; are un coeficient de frecare redus si o buna rezistenta la uzare.
- *Fonta maleabila antifricțiune* Fm A - 1, - 2. În unele cazuri înlocuieste bronzul.
- *Bronzuri* Bz 14 T, Bz 6 Zn T, Bz Pb 25, Bz Sn Pb 5, Bz-Sn Pb 22, Bz Al 10 T. Elementul de baza al aliajului este cuprul. Staniul, element traditional, este scump (deficitar).

Pentru cuzinetii masinilor-unelte aliajul de baza este Cu-Sn.

Bonzurile pentru lagare se utilizeaza în constructia cuzinetilor masivi pentru sarcini si turatii ridicate. Acestea suporta bine socurile. Aliajele respective se utilizeaza pentru lagare de turbine, motoare lente etc.

Bronzul cu aluminiu se apropie de Cu-Sn dar nu îi atinge performantele.

- *Compozitia de lagar pe baza de Sn* – „metal alb”, „compozitie”, „babit” Y-Sn 83, Y-Sn 80. Este cel mai bun dar si foarte scump. Se foloseste la sarcini si viteze mari. Se ajusteaza usor pe fus. Nu rezista la socuri mari. Rezista foarte bine la coroziune. Se foloseste la cuzinetii multistrat (cu grosimea de 0,08 ... 0,15 mm pentru stratul depus).

- *Compozitia de lagar pe baza de Pb* Y-Pb Sn 10, Y-Pb Sn 6 Sb 6. Se foloseste frecvent la motoarele clasice înlocuind compozitia de Sn care este scumpa. Rezista la socuri. Se utilizeaza pentru cuzinetii vapoarelor.

- *Compozitie de lagare pe baza de Cadmiu* multistrat are durabilitate ridicata.

- *Aliaje pe baza de Al* Y-Al Sb 5, Y-Al Sn 6 Cu Ni. Sunt rezistente la uzura si se folosesc la cuzinetii motoarelor. Se placheaza la rece (au grosimi de ordinul zecimilor de mm). Au o buna rezistenta la oboseala si la temperaturi sub 150°C.

- *Materialele sinterizate* au bune proprietati autolubrifiante si sunt folosite la masini textile si alimentare.

- *Poliamida* are prelucrabilitate buna; se poate utiliza în medii cu praf; are conductibilitate termica scazuta.

- *Teflonul* are un coeficient de frecare redus chiar fara ungere. Se poate folosi, eventual, la ungerea cu apa. Este rezistent la soc; se aplica în straturi subtiri.

- *Textolitul* este rezistent la coroziune (ungere cu apa); amortizeaza socurile; se pot realiza cuzineti masivi.

- *Lignofin sau lignoston* este lemn impregnat. Se foloseste la viteze mici, presiuni medii, ungere cu ulei sau apa. Este folosit în industria usoara (alimentara, textila) si metalurgica (laminoare).

- *Cauciucul* folosit la lagare pentru apa (pompe, elice de vapoare).

- *Sticla, pietrele pretioase* se folosesc în mecanica fina.

- *Metalele dure* se utilizeaza ca vârfuli de rezemare pentru viteze si presiuni mari la temperaturi ridicate.

- *Grafitul* se foloseste la cuzineti sinterizati. Se poate lubrifia cu apa. Este recomandat la temperaturi ridicate (180 ... 550°C).