

MODELE DE CALCUL PRIVIND STABILITATEA BRAȚELOR POMPELOR DE BETON ÎN EXPLOATARE

Prof. univ. dr.ing. Sârbu Laurențiu
Universitatea Tehnică de Construcții București

Rezumat

Articolul se referă la stabilitatea brațelor cu patru tronsoane articulate pentru pompele de beton montate pe camion, ținând seama de transportul betonului pompat în conducte de către pompa cu doi cilindrii, conform graficului presiunii de pompare.

Sunt analizate modelele de calcul pentru analiza oscilațiilor brațului articulat în poziția de lucru întins, în plan vertical –longitudinal și orizontal, și oscilațiile independente ale tronsonului de vârf la care s-au fost reduse masele conductelor de transport cu beton. Sunt indicate graficele presiunii de pompare și vitezei de transport a dopului de beton format în interiorul conductei pe un traseu orizontal și înclinat.

1.Generalități

Complexitatea constructivă a pompelor de beton cu braț montate pe camion este determinată de parametrii funcționali ceruți de transportul betonului; debitul de pompare, presiunea, distanța de transport pe orizontală și pe verticală a betonului, de structura mixturii betonului transportat, cât și de asigurarea unui traseu complex de transport al betonului în cazul apariției unor obstacole pe șantier, care necesită o anumită configurație a poziționării tronsoanelor de braț.

Structura brațului articulat este o unitate pliabilă, detașabilă care se poate monta și la vârful unui turn pentru lucru la punct fix pe șantier.

Paralel cu structura brațului (fig.1,a) este montată o coloană de transport a betonului alcătuită din țevi și din racorduri, care se termină cu un furtun care este manipulat de operator la turnarea betonului în cofrage pe șantier. (fig.1,b). [4]



Fig.1,a și b. Brațul desfășurat al pompei de beton (a) cu furtunul de capăt (b).

Pompabilitatea betonului este asigurată în conducte, de curgerea tamponului format, care este separat de pereții conductei de un strat de lubrifianț constând din pastă de ciment. Apa din pasta de ciment este legată hidraulic de spațiile dintre particule de rocă care se găsesc în dopul de beton format (fig.2, a). [1].

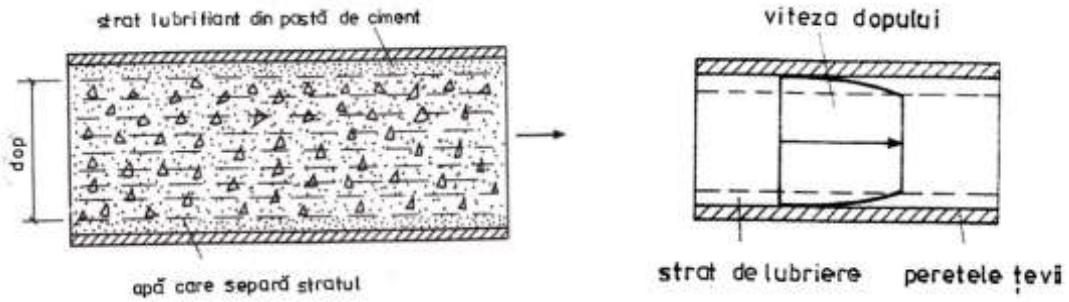


Fig.2.a și b. Transportul betonului prin conductă (a) și viteza dopului format (b).

Acordând teoria hidraulică la viteza de curgere a dopului în conductă, în plan vertical viteza este constantă pe înălțimea dopului. Viteza în zonele marginale, care traversează stratul de lubrifiere, este zero la contactul cu pereții conductei. Diagrama de viteză a dopului de beton este arătată în fig. 2, b.

Efectul lucrabilității, pompabilității și eficiența pompei de beton se poate exprima în funcție de forma graficului presiunii de pompare (fig.3), pe care aceasta îl ia în timpul testării pompei [1].

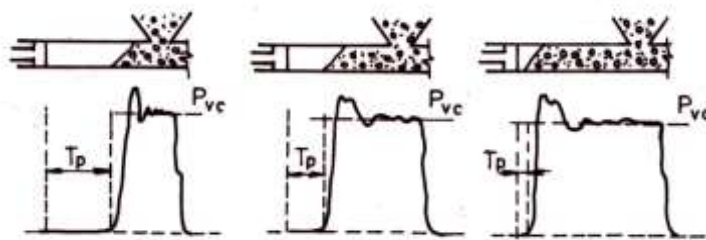


Fig.3.a,b și c. Efectul lucrabilității și pompabilității pompei după diagrama presiunii de pompare.

În fig.3, a, b și c putem distinge următoarele situații [2]:

cazul a) –dacă timpul T_p este mare, notat aici cu T_{pI} , avem: lucrabilitate proastă, eficiență mică la acumularea apei, slabă cantitate de material trecut prin instalație, rezistență mare la curgere (fig.3, a); cazul b) –dacă $T_{pII} < T_{pI}$, lucrabilitatea este medie, crește eficiența la acumularea apei, se reduce rezistența la curgere (fig. 3, b); și cazul c) –dacă $T_{pIII} < T_{pII} < T_{pI}$,

lucrabilitatea este bună, acumularea apei în material este bună, o cantitate mare de material este trecută prin instalație și rezistența la pompare este mică (fig. 3, c). Notății: P_{vc} –presiunea betonului la viteza constantă și T_p –timpul corespunzător ca pistonul pompei sa lovească materialul.

În fig. 4 este arătat graficul ridicat la înregistrarea parametrilor de lucru la efectuarea testelor asupra funcționării unei pompe de beton cu doi cilindri care lucrează în tandem echipată cu tub de comutare în S Putzmeister [2].

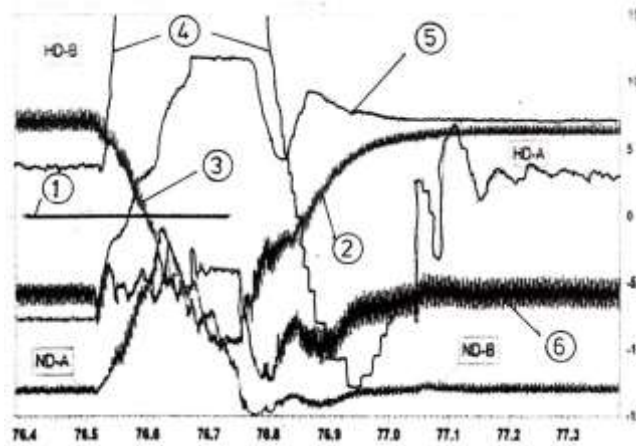


Fig.4. Parametrii înregistrați la funcționarea pompei de beton

Notății: 1 –reglarea la zero a mecanismului de transmitere; 2- presiune cilindru A; 3- presiune cilindru B; 4 –curentul bobinei la supapa de ulei; 6 –placă pătrată turnantă; 6 –presiunea de alimentare.

Alegerea adecvată a sistemului de conducte (cu pereți dubli) care lucrează la presiuni mari de pompare este la fel de importantă ca și alegerea pompei de beton și a unui braț adecvat.

2. Modelul de calcul pentru analiza oscilațiilor brațului articulată în plan vertical-longitudinal.

Modelarea brațului pliabil alcătuit din patru tronsoane articulate care este fixat la capul de turn rotitor montat pe șasiul camionului este prezentată în fig. 5. Cele patru tronsoane articulate, prevăzute fiecare cu câte un cilindru hidraulic pentru basculare independentă, sunt în poziție de lucru orizontală.

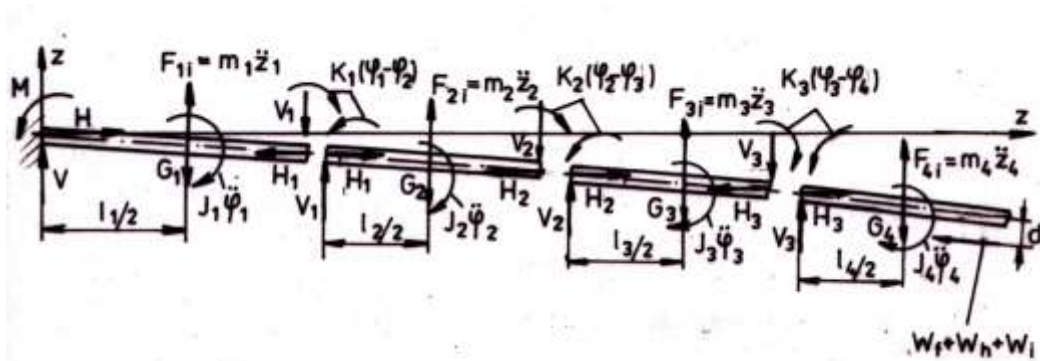


Fig.5. Schema de calcul a brațului cu patru tronsoane în plan vertical

În modelul de calcul analizat, tronsonul de bază (I) este reprezentat de o bară care la un capăt se consideră încastrată la turn, unde avem două reacțiuni în plan vertical-longitudinal V și H și un moment M determinat de acțiunea cilindrilor de basculare. În centrul de greutate al tronsonului de bază acționează forța de inerție verticală $m_1 \ddot{z}_1$ și momentul de inerție $J_1 \ddot{\varphi}_1$, iar la celălalt capăt al barei acționează reacțiunile V_1, H_1 și momentul de încastrare elastic $K_1(\varphi_1 - \varphi_2)$. După care, schema de încărcare se repetă și la celelalte trei tronsoane articulate ale brațului. Sistemul de ecuații (1) s-a scris pentru cele patru tronsoane articulate, el reprezintă modelul mecanic de calcul descris de ansamblul brațului articulat împreună cu coloana de transport a betonului.

Sistemul general de ecuații pentru structura brațului articulat în plan vertical-longitudinal rezultă de forma:

Tronson I :

$$V + m_1 \frac{l_1}{2} \ddot{y}_1 - V_1 - G_1 = 0;$$

$$H = H_1$$

$$-\frac{1}{6} m_1 l_1^2 \ddot{\varphi}_1 + V_1 \cdot l_1 + H_1 \cdot l_1 \cdot \varphi_1 + K_1(\varphi_1 - \varphi_2) = 0$$

Tronson II:

$$V_1 + m_2 \frac{l_2}{2} \ddot{\varphi}_2 - V_2 - G_2 = 0;$$

$$H_1 = H_2$$

$$-\frac{1}{6} m_2 l_2^2 \ddot{\varphi}_2 + V_2 \cdot l_2 + H_2 l_2 \cdot \varphi_2 + K_2(\varphi_2 - \varphi_3) = 0;$$

(1)

Tronson III:

$$V_2 + m_3 \frac{l_3}{2} \ddot{\varphi}_3 - V_3 - G_3 = 0;$$

$$H_2 = H_3;$$

$$-\frac{1}{6} m_3 l_3^2 \ddot{\varphi}_3 + V_3 l_3 + H_3 l_3 \varphi_3 + K_3 (\varphi_3 - \varphi_2) = 0;$$

Tronson IV:

$$V_3 + m_4 \frac{l_4}{2} \ddot{\varphi}_4 - G_4 = 0;$$

$$H_3 = F_p = W_f + W_h + W_i;$$

$$-\frac{1}{6} m_4 l_4^2 \ddot{\varphi}_4 + F_p \cdot l_4 \varphi_4 = 0,$$

unde: φ_i ($i=1\dots,4$) reprezintă rotirile în plan vertical ale fiecărui tronson în parte;

$G_i = m_i \cdot g, l_i$ – greutatea, respectiv lungimile fiecărui tronson de braț;

V_i = reacțiunile în plan vertical ale tronsoanelor pe direcția cilindrilor mecinsmului de basculare în acest caz;

$H_1 = H_2 = H_3 = H_4 = F_p$ – se consideră reacțiunea orizontală a tronsoanelor de braț egală cu forța de împingere a betonului de către cilindrii pompei.

m_i, J_1 – masele, respectiv momentele de inerție a primelor trei tronsoane articulate;

Notăm: $m_4 = m'_4 + m_{bc}$,

$$J_4 = J'_4 + J_{bc}, \quad (2)$$

în care m_4 este masa totală a tronsonului de vîrf alcătuită din masa proprie m'_4 și masa betonului conținută în conducta de transport redusă la tronsonul IV;

J_4 - momentul de inerție total al tronsonului de vîrf alcătuit din momentul de inerție propriu J'_4 și momentul de inerție al betonului conținut în conducta de transport redusă la tronsonul IV.

Forța necesară la pistonul pompei trebuie să fie mai mare decât suma rezistențelor la înaintare a betonului din conductă [5]:

$$F_p \geq W_f + W_h + W_i \quad (3)$$

unde $F_p = p \cdot \frac{\pi D_p^2}{4}$ este forța de împingere a pistonului pompei;

W_f – rezistența frecărilor dintre beton și conductă

$$W_f = P_p \cdot \frac{\pi D_c^2}{4}, \quad (4)$$

în care P_p - pierderea de presiune datorită frecărilor pe conductă;

D_c – diametrul conductei, și: p – presiunea de pompare și D_p – diametrul cilindrului pompei.

$$P_p = \frac{l}{R} \left(\frac{V}{K} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (5)$$

unde: l – este lungimea conductei totale echivalente;

R – raza hidraulică a conductei $R = \frac{D_c}{4}$;

V – viteza de deplasare a dopului de beton;

K – coeficient care scade odată cu creșterea consistenței betonului, a factorului A/C (apă/ciment) și a dozajului de ciment;

n – coeficient care crește odată cu consistența betonului

W_h – rezistența dată de presiunea coloanei verticale:

$$W_h = \gamma_b \cdot H \cdot \frac{\pi D_c^2}{4}, \quad (6)$$

în care: γ_b - masa volumică a betonului proaspăt;

H – înălțimea coloanei verticale;

W_i – rezistența datorită inerției betonului:

$$W_i = \rho \cdot L \cdot a \cdot \frac{\pi D_c^2}{4} \quad (7)$$

în care ρ – masa specifică a betonului;

L – lungimea coloanei de beton supusă accelerației în perioada de creștere a vitezei pistonului de la zero la V_{max} ;

a - accelerația betonului.

Valorile frecării specifice inițiale τ_0 și a coeficienților K și n [5]:

Tabelul 1

Tipul cimentului	τ_0 în gf/cm ²	K	N
Ciment potland cu consistență normală 25%	0,15 - 0,35	0,7 - 2,5	1,27 - 1,70
Ciment potland cu consistență normală 28 %	0,15 - 0,50	0,7 - 7,0	1,60 - 2,20

Se consideră rezistența specifică la forfecare de forma $\tau = (V/K)^{1/n} + \tau_0$, în care τ_0 este frecarea specifică inițială pentru care începe alunecarea laptelui de ciment în lungul conductei.

Accelerațiile rotirilor la cele patru tronsoane se consideră de forma:

$$\ddot{\phi}_1 = \frac{2}{m_1 l_1} (V_1 + G_1 - V);$$

$$\ddot{\phi}_2 = \frac{2}{m_2 l_2} (V_2 + G_2 - V_1);$$

$$\ddot{\varphi}_3 = \frac{2}{m_3 l_3} (V_3 + G_3 - V_2);$$

$$\ddot{\varphi}_4 = \frac{2}{m_4 l_4} (-V_3 + G_4).$$

Masele și lungimile celor patru tronsoane au fost alese arbitrar de forma: $m_1 = 6300$ kg; $m_2 = 4500$ kg; $m_3 = 2160$ kg; $m_4 = 1440$ kg; $l_1 = 12$ m; $l_2 = 11$ m; $l_3 = 9$ m și $l_4 = 8$ m.

Calculul constantelor de rigiditate cilindrică la încovoiere din legăturile elastice ale tronsoanelor de braț K_i ($i = 1, \dots, 3$) se face din expresiile coeficienților ecuației caracteristice obținute în urma egalării cu zero a determinantului sistemului de ecuații diferențiale ordinare (1) pentru care se aplică o soluție generală de forma $\varphi_i = e^{K_i t}$. În urma calculului rezultă determinantul sistemului:

$$\begin{vmatrix} -\frac{1}{6}m_1 l_1^2 \bar{K}^2 + (H_0 l_1 + K_1) & -K_1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{6}m_2 l_2^2 \bar{K}^2 + (H_0 l_2 + K_2) & -K_2 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{6}m_3 l_3^2 \bar{K}^2 + (H_0 l_3 + K_3) & -K_3 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{6}m_4 l_4^2 \bar{K}^2 \end{vmatrix} = 0$$

care reprezintă condiția de stabilitate a oscilației în regim static în plan vertical-longitudinal a brațului articulat.

Ecuația caracteristică este de forma:

$$ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e = 0 \quad (10)$$

cu rădăcinile

$$x_1 = 7,969 + i6,84; x_2 = 7,969 - i \cdot 6,84; x_3 = -4,719 + i6,34; x_4 = -4,719 - i \cdot 6,34$$

Natura rădăcinilor ecuației caracteristice ne arată dacă sistemul se comportă în mod stabil sau instabil în timpul lucrului.

Rigiditățile cilindrice la încovoiere sunt calculate din condițiile puse coeficienților ecuației caracteristice:

$$\frac{a}{e} > 0; \frac{b}{e} > 0; \frac{c}{e} > 0; \frac{d}{e} > 0 \quad (11)$$

Pentru modelul de calcul adoptat în fig. 1 cu caracteristicile date mai sus, au rezultat valorile rigidităților cilindrice la încovoiere: $K_1 = -376514$ daNm; $K_2 = -666050$ daNm; $K_3 = -522193$ daNm.

Soluția generală a oscilației brațului redusă la tronsonul de bază φ_1 din condiția asigurării stabilității, cu regim tranzitoriu de oscilație:

$$\varphi(j\bar{K}, \omega, t) = \frac{A+jB}{C+jB} \cos \bar{K}_1 t + \frac{D}{C+jB} \cos \bar{K}_3 t + \frac{e^{j\omega t}}{m_g(\omega^4 + a_1 j\omega^3 + b_1 \omega^2 + \omega^2 \dots)} \quad (12)$$

cu condițiile inițiale:

$$\ddot{\varphi}_1 = -2,479; \quad \dot{\varphi}_1 = 12,676 \text{ și } \ddot{\varphi}_3 = -7,014; \quad \varphi_1 = 0 \text{ și } \varphi_3 = -0,254.$$

Componenta tranzitorie conținută în soluția generală a rotirii φ_1 este neglijabilă iar constantele de integrare din (12) sunt:

$$A_1 = \frac{A+jB}{C+jB} = \frac{-120,32 + i163,12}{39,43 + i163,12}; \quad C_1 = \frac{D}{C+jB} = \frac{29,569}{39,43 + i163,12}.$$

Din calcule au rezultat:

$$\bar{K}_1 = 7,969 + i6,48; \quad \bar{K}_3 = -4,719 + i6,48, \quad (13)$$

$$\varphi_1 = 9,761 \cdot \varphi_3 - 2,479;$$

$$\text{pentru } \varphi_3 = 0; \quad \varphi_1 = -2,479, \quad \dot{\varphi}_1 = 25,048$$

$$a_1 = 6,502; \quad b_1 = 17,51; \quad \omega_{ne}^2 = -2138,65$$

$$\omega_{ne} = \sqrt{\frac{Kc}{mc}} = \sqrt{\frac{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3}{m_1 \cdot m_2 \cdot m_3}} = i \cdot 46,245 \text{ și } me = 6,12 \cdot 10^{10}$$

$$\omega_1 = 3,251 + i \cdot 4,184; \quad \omega_2 = 3,251 - i \cdot 4,184; \quad \omega_3 = 202,33; \quad \omega_4 = -87,54$$

Se pot studia astfel, regimurile staționare sau tranzitorii pentru diferite ipoteze privind amortizarea sistemului, sau caracterul forțelor de excitație și caracteristicile lor statice în ipoteza de amortizare a oscilațiilor Sorokin. Sistemul de braț desfășurat se comportă preponderent în regim de stabilitate indiferentă. Mărimea de ieșire a rotirii sistemului cu 4 grade de libertate, excitat de o forță aleatoare staționară notată $F_{ij} \rightarrow X_i(t) (i = 1, \dots, 4)$ în timpul procesului tranzitoriu, este un proces nestaționar care prezintă o deosebită importanță pentru aprecierea calitativă a sistemului în special pentru studiile de fiabilitate. Pentru un astfel de studiu, este necesar să determinăm caracteristica de frecvență a sistemului în regim tranzitoriu $\phi(j\omega t)$, care în acest caz este o funcție de timp.

Legea de oscilație a structurii brațului în plan vertical-longitudinal în condiții de stabilitate este arătată în fig. 6.

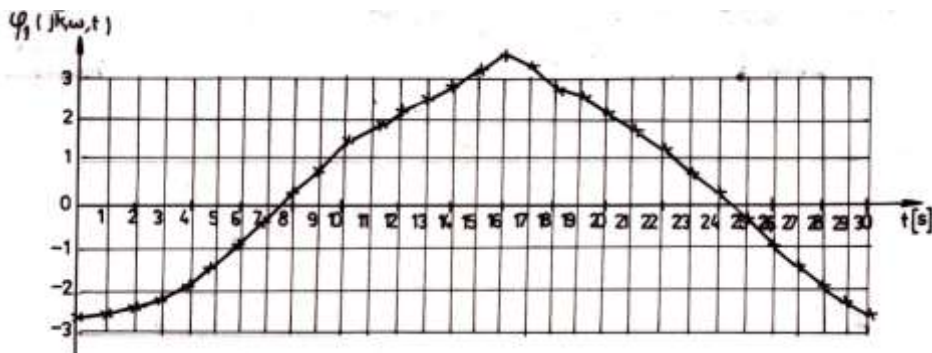


Fig.6.Oscilațiile verticale ale brațului

În fig.7,a este prezentată schema de principiu a funcționării cilindrilor hidraulici care acționează prin tijele lor, cilindri cu piston ai pompei de beton (fig.7,b), care pompează succesiv betonul în coloana de transport montată pe braț.

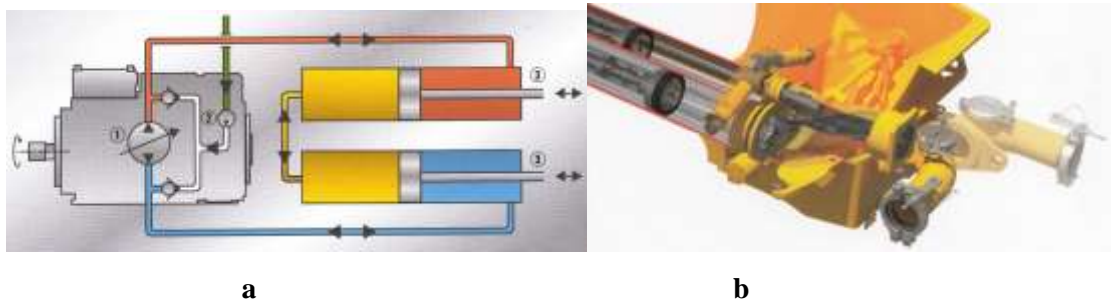


Fig.7,a si b. Schema de funcționare a cilindrilor hidraulici ai pompei (a), cu acționarea cilindrilor de pompare ai betonului (b) [1].

Notății: 1-pompa principală cu debit variabil; 2-pompa de alimentare; 3-cilindrii de mișcare.

Legendă culori: roșu - presiune mare; albastru –presiune mică; galben –ulei în mișcare; verde – partea de sucțiune a uleiului a pompei de alimentare.

O funcționare convenabilă și economică a pompelor de beton se face cu controlul SN (Surce Neutraliser) care se referă la valoarea vârfului de presiune la împingerea betonului peste caracteristica cilindrului (fig.8). Pompele noi Putzmeister sunt concepute pentru netezirea împingerii betonului în coloană. Intensitatea vârfurilor de presiune mărește durata de viață, în mișcarea de livrare a betonului fără o uzură accentuată a cilindrului de pompare [4].

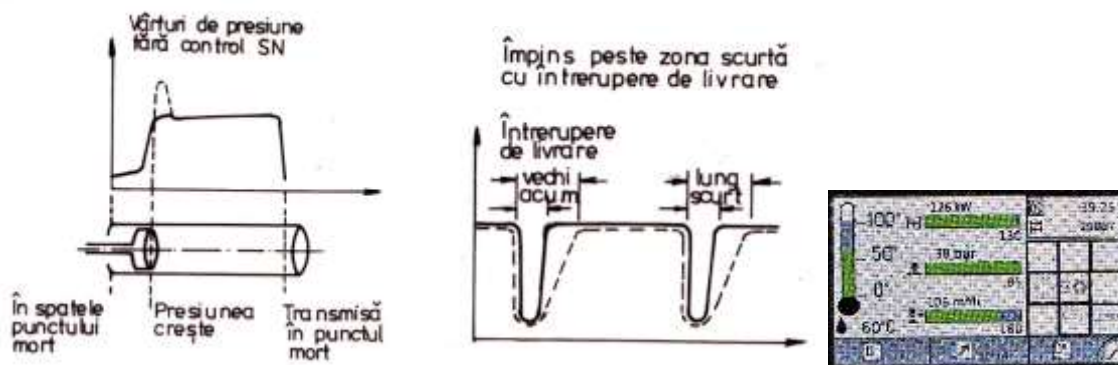


Fig.8,a si b. Diagrama de presiune în cilindrii de pompare[4]

Fig.9.Parametrii inregistrați[4]

În fig.8, a sunt arătate vârfurile de presiune fără control SN astfel, în spatele punctului mort al pistonului presiunea crește și mai departe se modifică până în punctul mort de la capătul cursei pistonului. În fig. 8, b este arătată acțiunea de împingere peste întreruperile scurte la livrarea betonului în conductă.

Caracteristicile transportului betonului în conductă pot fi vizualizate pe display-ul din fig.9, unde sunt indicate: puterea de lucru furnizată de motor, în kW; presiunea de pompare a betonului, în bar; și debitul de pompare, în m³/h.

În fig. 10, a,b și c este arătat modul de amortizare al vibrațiilor brațului la pompele Putzmeister în vederea îmbunătățirii productivității de pompare a betonului în coloană. Acest lucru se realizează cu ajutorul sistemului EBC (Ergonic Boom Control), care este un sistem de control pentru funcționarea liniștită și sigură a brațului. Cu sistemul EBC se reduce oscilația verticală a brațului cu aproximativ 1/3 din amplitudinea oscilației, astfel încât este limitată simultan și săgeata furtunului de capăt în toate direcțiile (fig.10, b și c)[2,4].

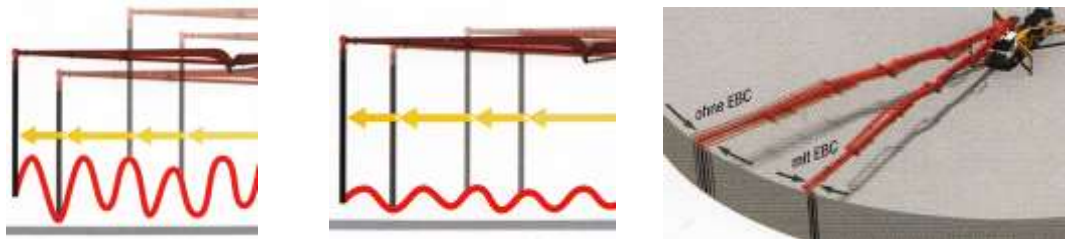


Fig.10,a,b și c. Oscilațiile proprii ale brațului în plan vertical (a), și oscilațiile amortizate înregistrate cu sistemul EBC în plan vertical și orizontal (b și c)[4].

3. Oscilațiile independente ale tronsonului de vârf al brațului la pomparea betonului în coloană (fig.11).

Ecuția rotirii φ_4 a construcției tronsonului de vârf este:

$$-\frac{1}{6}m_4 l_4^2 \ddot{\varphi}_4 - F_p \cdot l_4 \cdot \varphi_4 = 0. \quad (14)$$

Aici $H_3 = F_p = W_f + W_h + W_i$;

$$\text{sau: } p = \frac{1}{i^2} \left[\frac{4l}{D_c} \left(\frac{V}{K} \right)^{\frac{1}{n}} + \gamma_b \cdot H + \rho L \frac{dv}{dt} \right], \quad (15)$$

Considerăm pentru viteza betonului o soluție de forma $V = V_0 e^{\bar{K} v t}$ iar pentru presiune o creștere determinată de necesitatea împingerii dopului de beton de forma $p = p_0 e^{\frac{4\mu}{D_c} x}$,

$$\text{de unde: } \bar{K}_v = \frac{p_0 e^{\frac{4\mu}{D_c} x} - \frac{1}{i^2} \gamma_b \cdot H - \frac{1}{i^2} \frac{4 \cdot l}{D_c} \left(\frac{V_0}{K} \right)^{\frac{1}{n}} + \tau_0}{\rho L V_0^{\frac{1}{n}}} \quad (16)$$

în care: p- este presiunea maximă; p_0 - presiunea inițială ($p_0 = 0,14L \cdot \mu$) pe orizontală și $p_0 = 0,24 H$ pe verticală; x- lungimea dopului de beton; μ – coeficient de frecare $\mu = 0,2 - 0,4$; γ_b –greutatea volumică a betonului proaspăt.

Variația vitezei dopului de beton în conducta de transport $V = V_0 \cos \bar{K}vt$ este dată în graficul din fig.12.

Legea de rotire a tronsonului de vârf:

$$\varphi_4 = A_4 \cos \bar{K}_{4,1} t + B_4 \sin \bar{K}_{4,2} + C_4 \quad (17)$$

Expresia pulsației proprii \bar{K}_4^2 este de forma:

$$\bar{K}_{4(1,2)} = \pm i \sqrt{\frac{F_p}{\frac{1}{6} m_4 l_4}} = \pm i \sqrt{\frac{p_0 e^{\frac{4\mu}{D_c} \times \pi D_p^2}}{\frac{1}{6} m_4 l_4}}, \quad (18)$$

care corespunde creșterii presiunii la împingerea dopului de beton.

cu condițiile inițiale:

$$tg \varphi_4 = \frac{F \cdot l^2}{2K_3} \text{ și } \ddot{\varphi}_1 = \frac{2}{m_4 l_4} (-V_3 + G_4)$$

Pentru problema analizată, rezultă legea de rotire a tronsonului de vârf la transportul betonului prin conductă de forma:

$$\varphi_4 = A_4 \cos \bar{K}_{4,1} + C_4, \text{ indicată grafic în fig.11.} \quad (19)$$

unde: $\bar{K}_{(4)1,2} = \pm i 0,52$; $A_4 = 1,005$; $C_4 = -3,527$.

În fig.11 este trasată oscilația tronsonului considerat independent la vârful brațului, la transportul betonului prin coloană. Graficul vitezei dopului de beton în conductă este dat în fig.12.

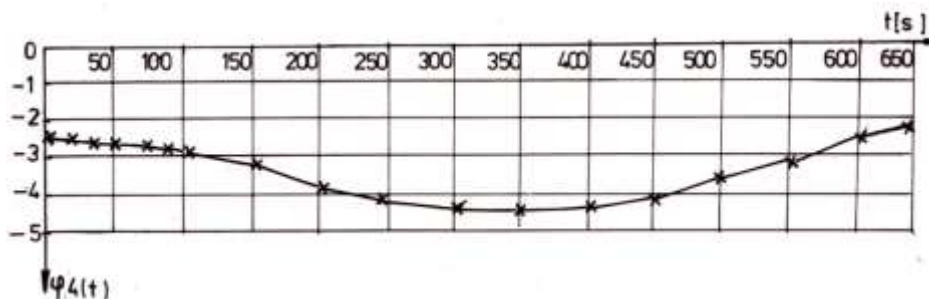


Fig.11. Oscilația independentă calculată a tronsonului de vârf

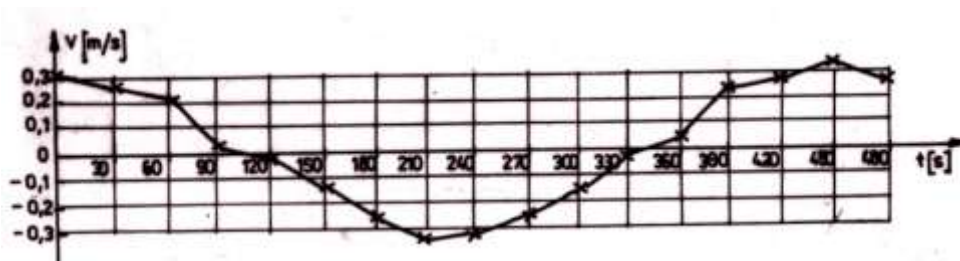


Fig.12. Oscilația vitezei calculată pe traseul conductei

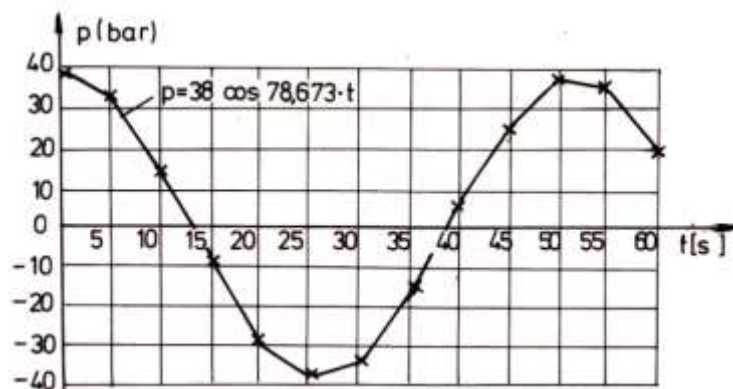


Fig.13. Variația presiunii calculată la pomparea betonului în funcție de rezistența specifică pe suprafața de curgere $R_c = \frac{D}{4} \cdot \frac{dp}{dt}$ [1].

Considerăm acum:

$$F_p = W_{pr} + W_{pi} \quad (20)$$

unde conform Putzmeister [1] $W_{pr} = p \cdot \frac{\pi D_c}{4}$, (21) iar presiunea de livrare necesară

este:

$$p = \frac{b \cdot 16}{\pi} \cdot \frac{Q \cdot L}{D^3} \cdot 10^{-6}, \quad (bar), \quad (22)$$

$$\text{și debitul de pompare } Q = \frac{\pi D^4}{4} \cdot l_c \cdot 60 \cdot n \cdot K_0 \left(\frac{m^3}{h} \right), \quad (23)$$

unde: W_{pr} – rezistența la frecare a dopului cu pereții interiori ai cilindrului;

W_{pi} – rezistența datorită inerției betonului care influențează valoarea presiunii de pompare cu 1 bar la 4 m înălțime.

D - diametrul conductei, în m; l_c – lungimea cilindrului, în m; n – numărul de curse duble/min.

K_0 – coeficient de corecție pentru aspirație $K_0 = 0,9$.

Putzmeister recomandă alegerea corectă a pompelor de beton cu ajutorul nomogramei din fig.14, pentru necesarul debitului de livrare folosind relațiile (22) și (23), calculul puterii motorului se face cu relația $N = \frac{p \cdot Q}{25} (kW)$ [4]. Dacă se folosesc aditivi se pot crea distorsiuni de la rezultatele obținute în cadranul din dreapta jos.

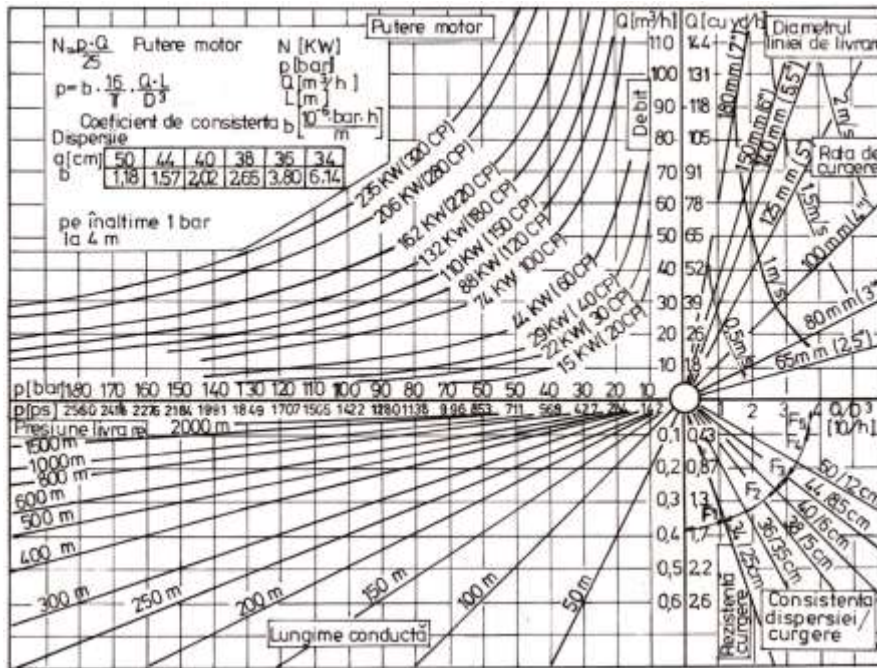


Fig.14. Diagrama de alegere a puterii pompei de beton în funcție de parametrii dati prin temă[4].

Exemplu de alegere a puterii pompei [4]:

Se dă debitul de pompare $40 m^3/h$, împrăștierea betonului $40 cm$ ($6 cm$ –tasare con de beton), linia de livrare are $D_c =125 mm$, lungimea de $300 m$ și o înălțime de $80 m$. *Rezolvare:* ducem o orizontală la linia debitului de $40 m^3/h$, la diametrul de $125 mm$, și de aici coborâm o verticală la împrăștierea de $40 cm$, și o linie orizontală la stânga la linia de livrare de $300 m$. Citim perpendicular pe orizontală presiunea de livrare necesară de $64 bar$. Pentru ridicarea pe verticală a betonului se adaugă $20 bar$ la $64 bar$ ($1 bar$ la $4 m$ înălțime). Ridicăm o verticală de la presiunea de $84 bar$ care se intersectează cu orizontala de $40 m^3/h$ și rezultă puterea motorului de acționare de $132 kW$.

4. Modelul de calcul pentru analiza dinamicii brațului în plan orizontal.

Aici schema de calcul este dată în fig.15. Schema ia în considerare comportamentul brațului elastic supus la vibrații transversale după fibra medie deformată.

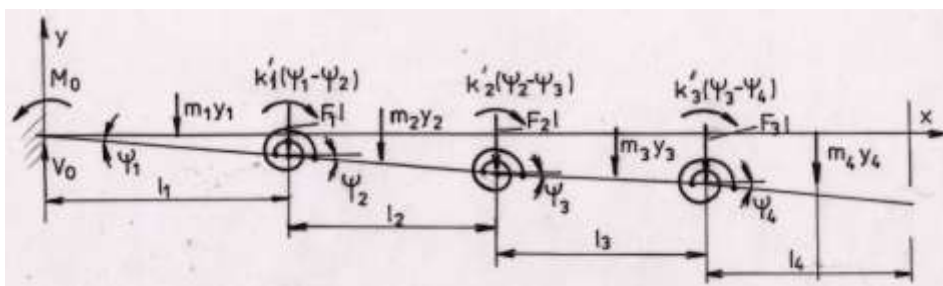


Fig.15. Schema de calcul a brațului cu patru tronsoane în plan orizontal

Asupra brațului în plan transversal-longitudinal acționează forțele de inerție transversale în centrele de greutate ale tronsoanelor, iar la vârful fiecărui tronson acționează forța concentrată redusă dată de acțiunea vântului lateral pe braț F_{vij} precum și momentele elastice $K_j(\psi_j - \psi_{j+1})$, unde $j=1, \dots, 4$.

La încastrarea brațului la turnul rotitor în plan orizontal acționează reacțiunea transversală V_0 și momentul M_0 .

Sistemul ecuațiilor de echilibru pentru cele patru tronsoane legate este dat de relațiile:

Tronson 1:

$$\sum M_0 = 0, \quad m_1 \ddot{y}_1 \frac{l_1}{2} + a \cdot F_1 l \cdot l_1 + K'_1(\psi_1 - \psi_2);$$

$$\sum V_0 = 0, \quad V_0 = m_1 \ddot{y}_1 + a \cdot F_1 l - V_1;$$

Tronson 2:

$$\sum M_1 = 0, \quad m_2 \ddot{y}_2 \frac{l_2}{2} + a \cdot F_2 l \cdot l_2 + K'_2(\psi_2 - \psi_3);$$

$$\sum V_1 = 0, \quad V_1 = m_2 \ddot{y}_2 + a \cdot F_2 l - V_2;$$

Tronson 3:

$$\sum M_2 = 0, \quad m_3 \ddot{y}_3 \cdot \frac{l_3}{2} + a \cdot F_3 l \cdot l_3 + K'_3(\psi_3 - \psi_4);$$

$$\sum V_2 = 0, \quad V_2 = m_3 \ddot{y}_3 + a \cdot F_3 l - V_3;$$

Tronson 4:

$$\sum M_3 = 0, \quad m_4 \ddot{y}_4 + a \cdot F_4 l \cdot l_4 = 0;$$

$$\sum V_3 = 0, \quad V_3 = m_4 \ddot{y}_4 + a \cdot F_4 l - V_4.$$

Notă cu a - este un coeficient $a \in (0,5 - 1,0)$ care ia în considerare poziția centrului de presiune lateral al acțiunii vântului pe tronson.

Dacă se ține seama de expresiile săgeților y_i și accelerațiilor acestora \ddot{y}_i în plan transversal în centrele de greutate ale tronsoanelor, adică:

$$y_1 = \psi_1 \cdot \frac{l_1}{2}, \quad \ddot{y}_1 = \ddot{\psi}_1 \frac{l_1}{2};$$

$$y_2 = \psi_1 l_1 + \psi_2 \cdot \frac{l_2}{2}; \quad \ddot{y}_2 = \ddot{\psi}_1 l_1 + \ddot{\psi}_2 \frac{l_2}{2};$$

$$y_3 = \psi_1 l_1 + \psi_2 l_2 + \psi_3 \frac{l_3}{2}; \quad \ddot{y}_3 = \ddot{\psi}_1 l_1 + \ddot{\psi}_2 l_2 + \ddot{\psi}_3 \frac{l_3}{2}$$

$$y_4 = \psi_1 l_1 + \psi_2 l_2 + \psi_3 l_3 + \psi_4 \frac{l_4}{2}; \quad \ddot{y}_4 = \ddot{\psi}_1 l_1 + \ddot{\psi}_2 l_2 + \ddot{\psi}_3 l_3 + \ddot{\psi}_4 \frac{l_4}{2}, \quad (25)$$

atunci sistemul de ecuații (24) devine:

$$m_1 \ddot{y}_1 \frac{l_1}{2} + F_1 l \cdot l_1 + K'_1(\psi_1 - \psi_2) = 0$$

$$m_2 \left(\ddot{\psi}_1 l_1 + \ddot{\psi}_2 \frac{l_2}{2} \right) + F_2 l \cdot l_2 + K'_2(\psi_2 - \psi_3) = 0$$

$$m_3 \left(\ddot{\psi}_1 l_1 + \ddot{\psi}_2 l_2 + \ddot{\psi}_3 \frac{l_3}{2} \right) + F_3 l \cdot l_3 + K'_3 (\psi_3 - \psi_4) = 0 \quad (26)$$

$$m_4 \left(\ddot{\psi}_1 l_1 + \ddot{\psi}_2 l_2 + \ddot{\psi}_3 l_3 + \ddot{\psi}_4 \frac{l_4}{2} \right) + F_4 l \cdot l_4 = 0$$

Determinantul sistemului este:

$$\begin{vmatrix} m_1 \frac{l_1}{2} \bar{K}^2 + K'_1 & -K'_1 & 0 & 0 \\ m_2 l_1 \bar{K}^2 & m_2 \frac{l_2}{2} \bar{K}^2 + K'_2 & -K'_2 & 0 \\ m_3 l_1 \bar{K}^2 & m_3 l_2 \bar{K}^2 & m_3 \frac{l_3}{2} \bar{K}^2 + K'_3 & -K'_3 \\ m_4 l_1 \bar{K}^2 & m_4 l_2 \bar{K}^2 & m_4 l_3 \bar{K}^2 & m_4 \frac{l_4}{2} \bar{K}^2 + \bar{K}^2 \end{vmatrix} = 0$$

Ecuția caracteristică bipătrată a determinantului rezultă de forma:

$$a_1 x^4 + b_1 x^3 + c_1 x^2 + d_1 x + e_1 = 0 \quad (28)$$

Soluția pentru oscilația brațului în plan transversal în condiții de stabilitate și cu componentă tranzitorie este:

$$\psi(j\theta_i, \omega_i, t) = A_2 \cos \bar{\theta}_1 t + B_2 \sin \bar{\theta}_2 t + C_2 \cos \bar{\theta}_3 t + D_2 \sin \bar{\theta}_4 t + \frac{e^{j\omega t}}{m_g (\omega^4 + c_1 j \omega^3 + d_1 \omega + \omega_{nc}^2)}. \quad (29)$$

unde pulsațiile sistemului stabil au valorile:

$$\bar{\theta}_1 = -220; \bar{\theta}_2 = 2212,03 \cdot 10^4; \bar{\theta}_3 = 51,63; \bar{\theta}_4 = -4257,94 \cdot 10^4, \text{ iar cele pentru}$$

componenta tranzitorie:

$$\omega_2 = 6,47 \cdot 10^6; \omega_{3,4} = \pm i \cdot 1,9925$$

În relația (29) componenta tranzitorie a oscilațiilor brațului în plan transversal este prezentă, iar în urma calculelor efectuate rezultă legea de oscilație de forma:

$$\psi(t) = \frac{1}{m_g (\omega^4 + c_1 j \omega^3 + d_1 \omega + \omega_{nc}^2)} \left[1 - \frac{\bar{\theta}_1^2 + \omega^2}{\bar{\theta}_1^2 - \bar{\theta}_3^2} \right] (\cos \bar{\theta}_1 t). \quad (30)$$

Pentru caracteristicile construcției alese în mod arbitrar rezultă legea de oscilație de forma:

$$\psi(t) = -0,0258 [1 + \cos(-220) \cdot t], \text{ a cărei reprezentare grafică este dată în figura 16.}$$

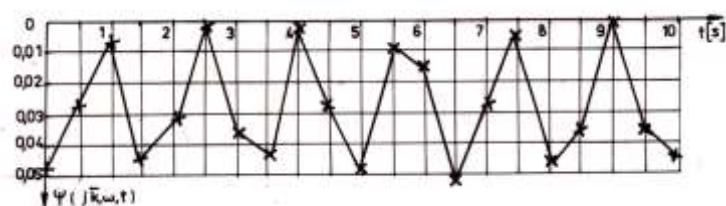


Fig.16. Oscilațiile brațului calculată în plan orizontal

5. Concluzii:

Dacă se urmăresc graficele oscilațiilor trasate pentru structura brațului și pentru parametrii sistemului de pompare, adică: presiunea și viteza dopului de beton în conducta de transport, în intervalul de timp de 60 s, se constată următoarele:

a) graficele care exprimă oscilațiile structurii $\varphi(t)$, fig.6, și $\psi(t)$, fig.16 luate într-un interval scurt de timp, au alături generală a oscilațiilor date de Putzmeister în [4], în plan vertical-longitudinal și transversal, oscilații care sunt amortizate cu sistemul de control EBC, care acționează asupra instalației hidraulice de basculare a tronsoanelor (v. fig.10, a, b, și c);

b) graficul de oscilație al tronsonului de vârf φ_4 considerat independent, (fig.11), indică o rotire accentuată, cu valoare negativă, care se petrece sub acțiunea pomparei betonului în coloana de transport, care s-a considerat reprezentată la acest tronson;

c) variația vitezei dopului de beton transportat în conductă se găsește pe ramura pozitivă în acest interval de timp (fig. 12). Este determinată de creșterea presiunii de pompare la împingerea betonului și de inerția acestuia în mișcare, pentru un raport de transmitere dat de diametre pompă/conductă $i = D_p/D_c=2$;

d) variația presiunii de pompare a betonului, în cilindru, corespunde segmentului de variație al presiunii de alimentare a coloanei pe porțiunea de timp respectivă, în funcție de rezistența la frecare cu pereții cilindrului și a inerției masei betonului (fig.13) .

Bibliografie:

1. **T.H. Cooke**- Concrete pumping and spraying a practical guide, Publisher by Relford Ltd. Tomas Telford Hanse, London, 1990;
2. **Knaupp** – Truck Mounted Concrete Pumps – Concrete placing Booms, Putzmeister în România prin Genco 93 S.A., PM Academie, Putzmeister Service, Germany, 2009;
3. Xxx - Putzmeister în România prin Genco 93 S.A. Tehnologia de formare a betonului pentru pompare, PM Putzmeister, Germany;
4. Xxx- Truck-mounted concrete pumps. The intelligent power packages, Putzmeister, The New Generation, Concrete Pumps GmbH, Germany 2012.
5. **Mihăilescu Ștefan, Valeriu Goran, Polidor Bratu** – Mașini de construcții, vol.3, Editura Tehnică, București, 1986.