

Debitul și evoluția presiunii la extruderul cu doi melci corotativi (II)**

VALERIU V. JINESCU, NICOLETA SPOREA*

Catedra Echipamente de Proces, Facultatea Inginerie Mecanică, Universitatea Politehnică București

The expression of the twin screw extruder flow rate was established in correlation with the filling degree and pressure variation along the screw. Starting from the twin screw extruder flow rate expression, the pressure evolution and the maximum pressure in the melting area have been calculated.

Keywords: twin-screw extruder, flow rate, crew

În prima parte a lucrării s-a stabilit expresia debitului extruderului cu doi melci corotativi, în corelație cu gradul de umplere și cu variația presiunii în lungul axei melcilor.

În această parte a II-a a lucrării se va calcula evoluția presiunii pornind de la expresia debitului extruderului cu doi melci corotativi.

Variația presiunii la extruderele cu doi melci corotativi

Se notează gradientul presiunii

$$\bar{p}_L = \frac{dp}{dL} \quad (36)$$

În continuare se analizează zonele cu spiră directă și cele cu spiră inversă. În zona cu spiră directă se produce creșterea presiunii ($\bar{p}_L > 0$), iar în zona cu spiră inversă presiunea scade ($\bar{p}_L < 0$).

Din relațiile (33) și (36) pentru cazul comportării newtoniene a topiturii, se obține următoarea expresie pentru gradientul de presiune, valabilă în afara zonei înguste de angrenare (numai dacă $k_u = 1$, $\bar{p}_L \neq 0$),

$$\bar{p}_L = \frac{\eta}{F_\beta \cdot \beta_1} \left[F_\alpha \cdot \alpha_1 \cdot n - \frac{Q_m}{\rho \left(2 \cdot n_s - 1 + \frac{\alpha_1 \cdot n_s}{\pi} \right)} \cdot \delta(\alpha_1) \right] \cdot \delta(\alpha_1), \quad (37)$$

unde s-a introdus notația

$$\delta(\alpha_1) = \begin{cases} 1, & \text{pentru elementele cu spiră directă;} \\ -1, & \text{pentru elementele cu spiră inversă.} \end{cases}$$

În zona îngustă de angrenare, pierderea de presiune suplimentară, Δp_s , poate fi adesea neglijată în comparație cu pierderea totală de presiune.

Se consideră o secțiune perpendiculară pe axele celor doi melci paraleli; evoluția presiunii de la intrarea, în punctul A și până la ieșirea în punctul B al primului melc (secțiunea este similară unei "camere de forma literei C"), urmată de evoluția în secțiunea celui de-al doilea melc, de la intrare, în punctul B', până la ieșirea în punctul A, este reprezentată în plan, în figura 8.

Pierderea de presiune suplimentară în zona îngustă de angrenare, Δp_s , se poate calcula cu relația

$$\Delta p_s = \Delta p_s(W, H) - \Delta p_s(W_1, H_1)$$

scrisă pentru curgerea prin filiere plate. Se obține:

$$\Delta p_s = \frac{12 \cdot \eta \cdot H \cdot Q_{m,c}}{(H_1)^3} \left(\frac{1}{W} - \frac{1}{W_1} \right), \quad (38)$$

* email: nsporea@yahoo.com

** Prima parte a lucrării a apărut în Mat. Plast. vol. 43, nr. 4, 2006, p. 296

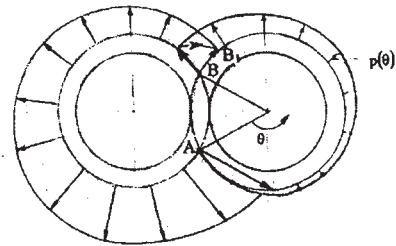


Fig. 8. Evoluția presiunii în cele două camere succesive de forma literei "C"

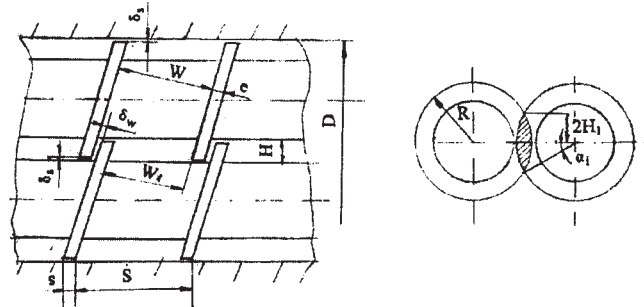


Fig. 9. Vedere și secțiune prin doi melci corotativi angrenați

unde (fig. 9):

$$H_1 = \frac{R \cdot \sin \alpha_1}{2}$$

$$W_1 = W - (e + \delta_w)$$

Evoluția presiunii pe lungimea melcului este reprezentată în figura 10.

Pierderea de presiune pe lungimea elementelor cu spiră inversă se scrie (fig. 10):

$$\Delta p_{inv} = L_{1,inv} \cdot \left. \frac{dp}{dL} \right|_{inv} + v_{inv} \cdot \Delta p_s \quad (39)$$

unde v_{inv} este numărul de elemente cu spiră inversă cu $n_{s,i}$ începuturi ($n_{s,i}$ reprezintă numărul de începuturi ale elementelor cu spiră inversă); $L_{1,inv}$ este lungimea axială în zona cu spiră inversă corectată, ținând cont de curgerea pe lungimea circulară ($2\pi - 2\alpha_1$) în loc de 2π ,

$$L_{1,inv} = v_{inv} \cdot S \cdot \left(1 - \frac{\alpha_1}{\pi} \right) \quad (40)$$

cu $S = \pi \cdot D \cdot \sin \varphi$.

Lungimea medie a unei camere de forma literei "C" pe direcția z (fără zona de angrenare) este:

$$Z = (\pi - \alpha_1) \frac{D - H}{\cos \varphi} \quad (41)$$

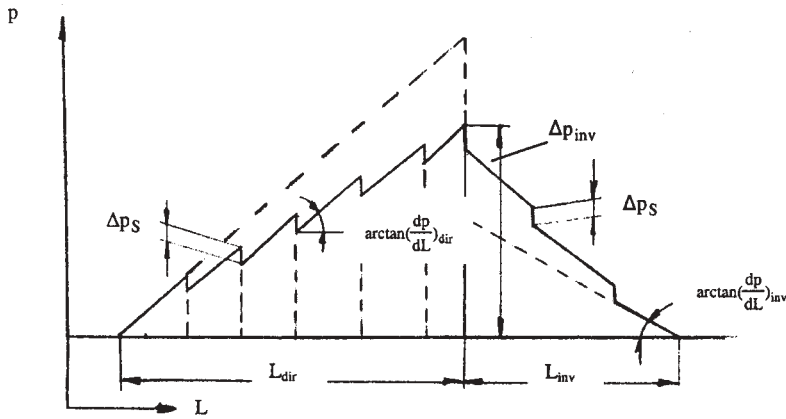


Fig. 10. Evoluția presiunii în lungul melcului, în secțiunile cu spiră directă (L_{dir}) și respectiv inversă (L_{inv})

Numărul de elemente cu spiră directă care contribuie la creșterea presiunii
În general se poate scrie (fig. 10):

$$\Delta p_{inv} = L_{dir} \cdot \left(\frac{dp}{dL}\right)_{dir} - v_{dir} \cdot \Delta p_s \quad (42)$$

unde $L_{dir} = v_{dir} \cdot S$ este lungimea axială a zonei cu spiră directă; v_{dir} - numărul de elemente cu spiră directă cu $n_{s,d}$ începuturi ($n_{s,d}$ reprezintă numărul de începuturi ale elementelor cu spiră directă).

Din relația (42) rezultă:

$$v_{dir} = \frac{\Delta p_{inv}}{S \cdot \left(\frac{dp}{dL}\right)_{dir} - \Delta p_s} \quad (43)$$

În cazul izoterm, după înlocuirea lui Δp_{inv} din relația (39) se obține:

$$v_{dir} = v_{inv} \frac{S \cdot (1 - \frac{\alpha_i}{\pi}) \cdot \left|\frac{dp}{dL}\right|_{inv} + \Delta p_s}{S \cdot \left(\frac{dp}{dL}\right)_{dir} - \Delta p_s} \quad (44)$$

Dacă este foarte mic, poate fi neglijat și se obține:

$$v_{dir} \approx v_{inv} \frac{\left|\frac{dp}{dL}\right|_{inv} \cdot (1 - \frac{\alpha_i}{\pi})}{\left(\frac{dp}{dL}\right)_{dir}} \quad (45)$$

Cu notațiile:

$$A = F_\alpha \cdot \alpha_1 \cdot n; \quad B = \frac{Q_m}{\rho \cdot (2n_s - 1 + \frac{\alpha_i \cdot n_s}{\pi})}; \quad C = \frac{\eta}{F_\beta \cdot \beta_1} \quad (46)$$

din relația (37) rezultă:

$$\bar{p}_L = C \cdot [A - B \cdot \delta(\alpha_i)] \cdot \delta(\alpha_i) \quad (47)$$

Cu notațiile (46), relația (45) devine:

$$v_{dir} = v_{inv} \cdot \left(\frac{1 + \frac{B}{A}}{1 - \frac{B}{A}}\right) \left(1 - \frac{\alpha_i}{\pi}\right), \quad (48)$$

în care s-a ținut seama de semnificația lui $\delta(\alpha_i)$ de la relația (37).

În cazul comportării neneutroniene A se înlocuiește cu

$$A^* = A \cdot \left(\frac{4 + \nu}{5}\right)$$

iar B se înlocuiește cu

$$B^* = B \cdot \left(\frac{3}{1 + 2\nu}\right),$$

în care A și B se calculează cu relațiile (46), iar η din expresia lui C se calculează cu relația (20).
Se poate observa că v_{dir} este mic dacă raportul B/A este mic.

Exemplu de calcul

Se consideră un extruder cu doi melci corotativi cu următoarele caracteristici geometrice:

- diametrul melcului, $D = 25$ mm;
- pasul, $S = 25$ mm;
- distanța dintre axele melcilor, $L_c = 21$ mm;
- adâncimea canalului melcului, $H = 4$ mm;
- lățimea spirei melcului, $e = 1,5$ mm;
- jocul dintre melc și cilindru, $\delta_s = 0,1$ mm;
- numărul de începuturi ale elementelor cu spiră inversă, $n_{s,i} = 1$;
- numărul de începuturi ale elementelor cu spiră directă, $n_{s,d} = 1$;
- jocul dintre spirele melcilor, $\delta_{sw} = 0,2$ mm;
- numărul de elemente cu spiră inversă, $v_{inv} = 2$;

Materialul prelucrat este polietilena de joasă densitate, PE 5810 G care are următoarele caracteristici:

- densitatea intrinsecă, $\rho = 919$ kg/m³;
- vâscozitatea topiturii, $\eta = 1392$ Pa . s;
- raportul $\eta_s / \eta = 0,1$.

Caracteristicile funcționale sunt:

- turația melcilor, $n = 205$ rot/min;
- debitul masic, $Q_m = 3$ kg/h.

a) Calcularea caracteristicilor geometrice ale melcilor

$$\tan \varphi = \frac{S}{\pi(D-H)} = 0.379; \quad \varphi = 20.756 \text{ grad};$$

$$\cos \alpha_i = \frac{L_c}{D} = 0.84; \quad \alpha_i = 32.859 \text{ grad} = 0.573 \text{ rad};$$

$$W_n = \frac{\pi}{n_s} \cdot k_{H1} \cdot k_s \cdot D \cdot \sin \varphi = \frac{\pi}{1} \cdot 0.84 \cdot 0.936 \cdot 25 \cdot \sin 20,756 = \begin{cases} 21.856 & \text{- zona cu spiră directă;} \\ 21.856 & \text{- zona cu spiră inversă;} \end{cases} \quad (34)$$

$$\text{unde } k_{H1} = 1 - \frac{H}{D} = 1 - \frac{4}{25} = 0.84;$$

$$k_s = 1 - \frac{n_s \cdot e}{S \cdot \cos \varphi} = 1 - \frac{1 \cdot 1.5}{25 \cdot \cos 20.756} = \begin{cases} 0.936 & \text{- zona cu spiră directă;} \\ 0.936 & \text{- zona cu spiră inversă;} \end{cases}$$

b) Calcularea factorilor de corecție

$$F_d = 1 - 0.571 \cdot \frac{H}{W} = 1 - 0.571 \cdot \frac{4}{21.856} = \begin{cases} 0.895 & \text{- zona cu spiră directă;} \\ 0.895 & \text{- zona cu spiră inversă;} \end{cases} \quad (4)$$

$$F_p = 1 - 0.625 \cdot \frac{H}{W} = 1 - 0.625 \cdot \frac{4}{25} = \begin{cases} 0.886 & \text{- zona cu spiră directă;} \\ 0.886 & \text{- zona cu spiră inversă;} \end{cases} \quad (4)$$

$$f_d = \frac{\left(\frac{H}{\delta_s}\right)^3 \left(\frac{\eta_s}{\eta}\right) - 1}{\left(\frac{H}{\delta_s}\right)^3 \frac{\eta_s}{\eta} + \frac{W}{e}} = \frac{\left(\frac{4}{0.1}\right)^3 (0.1) - 1}{\left(\frac{4}{0.1}\right)^3 \cdot 0.1 + \frac{21.856}{1.5}} = \begin{cases} 0.998 & \text{- zona cu spiră directă;} \\ 0.998 & \text{- zona cu spiră inversă;} \end{cases} \quad (6)$$

$$f_p = \frac{1 + \left(\frac{e}{W}\right)^2 + \left(1 + \frac{e}{W}\right) / \tan^2 \varphi}{1 + \frac{e}{W} \cdot \frac{\eta_s}{\eta} \cdot \left(\frac{H}{\delta_s}\right)^3} = \frac{1 + \left(\frac{1.5}{21.856}\right)^2 + \left(1 + \frac{1.5}{21.856}\right) / \tan^2 20.756}{1 + \frac{1.5}{21.856} \cdot 0.1 \cdot \left(\frac{4}{0.1}\right)^3} =$$

$$= \begin{cases} 0.02 & \text{- zona cu spiră directă;} \\ 0.02 & \text{- zona cu spiră inversă;} \end{cases} \quad (6)$$

$$f_{d,c} = \frac{1}{2(H/D)} \cdot \frac{\ln\left[\frac{1}{1-(H/D)}\right]}{\frac{H}{D} \cdot \left[\left(\frac{1}{1-(H/D)}\right)^2 - 1\right]} = \frac{1}{2(4/25)} \cdot \frac{\ln\left[\frac{1}{1-(4/25)}\right]}{\frac{4}{25} \cdot \left[\left(\frac{1}{1-(4/25)}\right)^2 - 1\right]} = 0.519$$

(rel. 8, în care diametrul D se înlocuiește cu diametrul melcui $D_m = D - 2H$);

$$F_\alpha = F_d \cdot f_d \cdot \left(1 - \frac{\delta_s}{H}\right) \cdot f_{d,c} = 0.895 \cdot 0.998 \cdot \left(1 - \frac{0.1}{4}\right) \cdot 0.519 = \begin{cases} 0.452 & \text{-zona cu spiră directă;} \\ 0.452 & \text{-zona cu spiră inversă;} \end{cases} \quad (9)$$

$$F_\beta = F_p \cdot (1 + f_p) \cdot f_{p,c} = 0.886 \cdot (1 + 0.02) \cdot 1 = \begin{cases} 0.904 & \text{-zona cu spiră directă;} \\ 0.904 & \text{-zona cu spiră inversă;} \end{cases} \quad (9)$$

c) Calculul factorilor α_1 și β_1

$$\alpha_1 = \alpha \cdot (k_{H2} \cdot \cos^2 \varphi) = \frac{W \cdot H}{2} (\pi \cdot D \cdot \cos \varphi) \cdot \left(1 - 2 \frac{H}{D}\right) \cdot \cos^2 \varphi = \frac{21.856 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot (\pi \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot \cos 20.756) \cdot \left(1 - 2 \frac{4}{25}\right) \cdot \cos^2 20.756 = \begin{cases} 1.908 \cdot 10^{-6} & \text{-zona cu spiră directă;} \\ 1.908 \cdot 10^{-6} & \text{-zona cu spiră inversă;} \end{cases} \quad (13)$$

$$\beta_1 = \beta \sin \varphi = \frac{W \cdot H^3}{12} \cdot \sin \varphi = 21.856 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{(4 \cdot 10^{-3})^3}{12} \cdot \sin 20.756 = \begin{cases} 4.126 \cdot 10^{-11} & \text{m}^4\text{-zona cu spiră directă;} \\ 4.126 \cdot 10^{-11} & \text{m}^4\text{-zona cu spiră inversă;} \end{cases} \quad (15)$$

d) Gradientul de presiune

$$\alpha_i = \frac{\pi}{n_s} - 2\alpha_i = \frac{180}{1} - 2 \cdot 32.859 = \begin{cases} 114.282 & \text{grd-zona cu spiră directă;} \\ 114.282 & \text{grd-zona cu spiră inversă;} \end{cases}$$

$$A = F_\alpha \cdot \alpha_i \cdot n = 0.452 \cdot 1.908 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{205}{60} = \begin{cases} 2.949 \cdot 10^{-6} & \text{m}^3/\text{s-zona cu spiră directă;} \\ 2.949 \cdot 10^{-6} & \text{m}^3/\text{s-zona cu spiră inversă;} \end{cases} \quad (46)$$

$$B = \frac{Q_m}{\rho \cdot (2n_s - 1 + \frac{\alpha_i \cdot n_s}{\pi})} = \frac{3}{919 \cdot \left(2 \cdot 1 - 1 + \frac{114.282 \cdot 1}{180}\right)} = \begin{cases} 5.546 \cdot 10^{-7} & \text{m}^3/\text{s-zona cu spiră directă;} \\ 5.546 \cdot 10^{-7} & \text{m}^3/\text{s-zona cu spiră inversă;} \end{cases} \quad (46)$$

$$C = \frac{\eta}{F_\beta \cdot \beta_1} = \frac{1392}{0.904 \cdot 4.126 \cdot 10^{-11}} = \begin{cases} 3.733 \cdot 10^{13} & \text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^4 \quad \text{zona cu spiră directă;} \\ 3.733 \cdot 10^{13} & \text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^4 \quad \text{zona cu spiră inversă;} \end{cases} \quad (46)$$

După înlocuiri în relația (47) se obține

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_{dir} = 8.939 \cdot 10^7 \text{ Pa/m} \quad \left(\frac{dp}{dL}\right)_{inv} = -1.308 \cdot 10^8 \text{ Pa/m}$$

e) Presiunea maximă

$$p_{max} = \Delta p_{inv} \approx L_{inv} \cdot \left|\frac{dp}{dL}\right|_{inv} = v_{inv} \cdot S \cdot \left(1 - \frac{\alpha_i}{\pi}\right) \cdot \left|\frac{dp}{dL}\right|_{inv} \quad (49)$$

(deoarece pierderea de presiune suplimentară în zona îngustă de angrenare, Δp_s , este foarte mică, se poate neglija). În urma înlocuirii mărimilor din relația (49) se obține,

$$p_{max} = 5,946 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 5,946 \text{ MPa}$$

În experimentele efectuate pentru cazul concret analizat, presiunea maximă măsurată a fost de 5,878 MPa [14], ceea ce înseamnă o abatere de 1,15% a valorii calculate față de valoarea determinată experimental.

f) Numărul de elemente cu spiră directă care produce creșterea presiunii rezultă din relația (45),

$$v_{dir} = v_{inv} \frac{\left|\frac{dp}{dL}\right|_{inv} \cdot \left(1 - \frac{\alpha_i}{\pi}\right)}{\left(\frac{dp}{dL}\right)_{dir}} = 2 \cdot \frac{1.308 \cdot 10^8 \cdot \left(1 - \frac{32.859}{180}\right)}{8.939 \cdot 10^7} = 2.39$$

Concluzii

S-a stabilit expresia pentru evoluția presiunii în extruderul cu doi melci corotativi, pornind de la relația debitului. Relațiile obținute au fost aplicate pe o geometrie dată. În aplicația efectuată pentru un caz concret au fost calculate presiunea maximă în zona de topire și numărul de spire directe care participă la generarea presiunii.

Bibliografie

14. SPOREA, N., Optimizarea extruderelor cu doi melci corotativi utilizate în industria alimentară, Teză de doctorat, U.P.B., 2006
Întrât în redacție: 17.10.006