

**ELEMENTE DE INGINERIE ȘI UTILAJE PENTRU  
PRELUCRAREA POLIMERILOR**

**Prof. dr.ing. Constanța Ibănescu**

**Dr.ing. Maricel Danu**

**Dr.ing. Sorin Alexandru Ibănescu**

## Cuprins

### **Capitolul I. MAȘINI ȘI INSTALAȚII PENTRU TRANSPORTUL INTERN..... 6**

1.1. Clasificare -----	6
1.2. Transportoare cu banda -----	7
1.2.1. Construcția transportoarelor cu bandă.....	8
1.2.2. Calculul transportoarelor cu bandă .....	11
1.3. Transportoare cu lanțuri -----	14
1.4. Transportoare cu role -----	16
1.5. Transportorul cu melc-----	17
1.6. Instalații pentru transportul pneumatic-----	18
1.6.1. Viteza de plutire .....	20
1.6.2. Dispozitive anexe .....	20

### **Capitolul II. MAȘINI PENTRU AMESTECARE ȘI MALAXARE..... 21**

2.1. Introducere -----	21
2.1.1. Amestecare simplă laminară.....	23
2.1.2. Amestecarea dispersivă .....	24
2.1.3. Mecanismul amestecării .....	25
2.1.4. Măsurarea amestecării.....	25
2.1.5. Clasificarea amestecătoarelor .....	25
2.2 Amestecătoare cu tobă rotativă -----	26
2.2.1 Calculul amestecătoarelor cu tobă rotativă.....	28
2.3 Amestecătoare cu organe interne -----	31
2.3.1 Amestecătorul cu melc orizontal .....	31
2.3.2 Amestecătoare cu bandă.....	34
2.3.3 Malaxorul centrifugal.....	36
2.3.4 Amestecătoarele cu melci verticali și planetari .....	37
2.3.5 Amestecătorul intensiv și cel rapid .....	38
2.3.6 Amestecătorul centrifugal cu impact.....	40
2.3.7 Amestecătoare pneumatice .....	40
2.4 Malaxoare -----	41
2.4.1 Malaxoare cu brațe duble .....	43
2.4.2 Malaxoare cu rotoare.....	45

2.4.3 Calculul malaxoarelor .....48

**Capitolul III. VALȚURI ȘI CALANDRE ..... 51**

3.1. Introducere ----- 51

3.2. Principiul de realizare a operațiilor de vălțuire sau calandrare 52

3.3. Condiția de apucare a materialului între cilindri ----- 53

3.4. Dimensionarea materialului apucat între cilindri ----- 54

3.5. Construcția valțurilor și calandrelor ----- 54

    3.5.1. Batiuri ..... 55

    3.5.2. Cilindri..... 56

    3.5.3. Compensarea săgeții cilindrilor ..... 58

    3.5.4. Lagărele valțurilor și calandrelor ..... 61

3.6. Acționarea valțurilor și calandrelor----- 62

3.7. Calculul puterii pentru antrenarea valțurilor și calandrelor -- 65

3.8. Calculul productivității valțurilor și calandrelor ----- 68

3.9. Reglarea regimului termic la valțuri și calandre ----- 70

3.10. Dispozitive auxiliare ----- 71

3.11. Tehnica securității în muncă la valțuri și calandre ----- 72

3.12. Teoria curgerii materialelor între cilindrii antrenați în sensuri  
inverse și presați. ----- 73

    3.12.1. Fluide Newtoniene ..... 73

    3.12.2. Profilul presiunii ..... 79

    3.12.3. Distribuția vitezelor..... 81

3.13. Puterea necesară pentru antrenarea cilindrilor și forța de  
depărtare----- 84

3.14. Curgerea fluidelor ne-Newtoniene ----- 85

**Capitolul IV. PRESE ..... 90**

4.1. Clasificarea preselor----- 90

4.2. Construcția elementelor preseii----- 92

    4.2.1. Cilindrul de lucru ..... 92

    4.2.2. Pistonul de lucru ..... 92

    4.2.3. Coloanele ..... 93

    4.2.4. Masa și traversa preselor cu coloane..... 93

    4.2.5. Platoul mobil..... 94

    4.2.6. Cadrul preselor cu cadru..... 94

4.3. Acționarea și comanda preselor----- 94

**Capitolul V. ELEMENTE DE INGINERIA  
PROCESULUI DE FILARE SI MASINI DE**

<b>FILAT.....</b>	<b>98</b>
5.1. Clasificarea mașinilor de filat -----	98
5.2. Componenta unei mașini de filat -----	99
5.3. Principiile solidificării -----	100
5.3.1. Transferul de căldură.....	103
5.3.2. Transferul de masă .....	106
5.3.3. Tranziții de fază și procese însoțitoare.....	108
5.4. Filarea din topitură -----	112
5.4.1. Considerații generale.....	112
5.4.2. Transferul de căldură la filarea din topitură .....	114
5.4.3. Filarea din topitură nestaționară.....	117
5.5. Filarea din soluție (umedă și uscată) -----	122
5.5.1. Introducere.....	122
5.5.2. Dinamica și cinematica filării din soluție.....	125
5.5.3. Solidificarea soluțiilor de polimer.....	132
5.5.4. Ecuațiile fundamentale ale filării uscate și rezolvarea lor	134
5.5.5. Solidificarea în filarea umedă.....	137
5.6. Elemente de construcție a mașinilor de filat-----	151
5.6.1. Mașini de filat din topitură cu grilă de topire .....	151
5.6.2. Mașină de filat din topitură cu extruder .....	153
5.6.3. Pompe de dozare .....	156
5.6.4. Filiere.....	157
<b>Bibliografie.....</b>	<b>159</b>



## Capitolul I. MAȘINI ȘI INSTALAȚII PENTRU TRANSPORTUL INTERN

În cadrul acestui prim capitol se vor trata unele probleme de construcție, funcționare și calcul pentru cele mai utilizate mașini și instalații pentru transportul intern în industria de sinteză și prelucrare a polimerilor. Toate aceste mașini și instalații pot fi considerate ca mijloace de transport pur sau ca instalații cu funcție tehnologică.

### 1.1. Clasificare

Din multitudinea de criterii care pot fi utilizate pentru clasificarea mijloacelor de transport reținem clasificarea *după modul de funcționare*:

- a) Cu funcționare continuă
- b) Cu funcționare discontinuă

La rândul lor mijloacele de transport cu funcționare continuă pot fi clasificate *după modul de acționare*:

- 1) *Mecanice*
  - a. Cu organ flexibil de tracțiune
    - ✓ Cu banda
    - ✓ Cu lanțuri
    - ✓ Cu racleți, etc.
  - b. Fără organ flexibil de tracțiune
    - ✓ Cu role
    - ✓ Cu melc
    - ✓ Gravitaționale
- 2) *Pneumatice*
  - a. Cu aspirație
  - b. Cu refulare

c. Mixte

3) *Hidraulice*

În cele ce urmează se vor trata numai mijloacele de transport mecanice și pneumatice.

## 1.2. Transportoare cu bandă

Transportoarele cu bandă sunt mijloace de transport intern foarte răspândite, cu multiple utilizări, atât pentru transportul materialelor mărunte, cât și pentru transportul sarcinilor unitare. Distanța de transport poate să ajungă până la cateva sute de metri, putând funcționa în serie sau în plan înclinat.

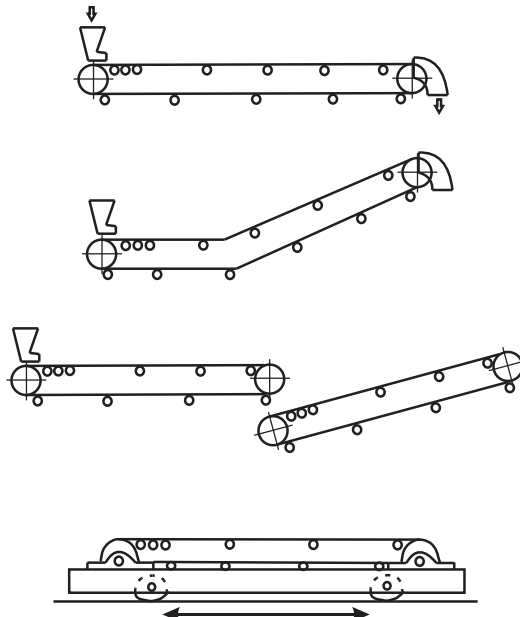


Figura 1.1 Diferite moduri de funcționare a transportoarelor cu bandă

### 1.2.1. Construcția transportoarelor cu bandă

Figura 1.2 furnizează schema simplificată de construcție a unui transportor cu bandă. Elementele constructive cele mai importante sunt: banda (1), rolele de susținere a acesteia (2) plasate atât pe ramura activă (lucrătoare), cât și pe cea liberă, tamburul de acționare (3) și cel de întindere (4), pâlnia de alimentare (5), dispozitivul de descărcare (6), dispozitivul de întindere (7) și sistemul de acționare format din motorul (8) și reductorul (9). Părțile componente ale transportorului se montează de regulă pe un cadru (10) alcătuit din profile mecanice.

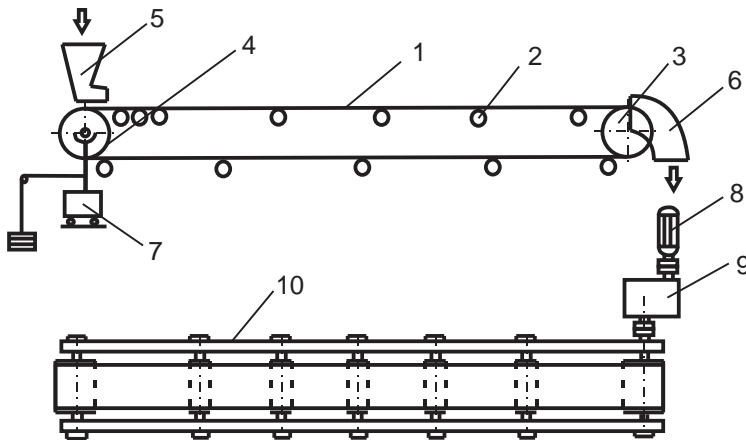


Figura 1.2 Construcția unui transportor cu bandă

#### *Banda transportoare*

Banda transportorului se confecționează din cauciuc cu inserții textile sau din țesătură metalică și uneori chiar din fibre textile, în funcție de proprietățile materialului transportat. Greutatea benzii pe unitatea de lungime este o caracteristică importantă a benzilor transportoare; la fel și lățimea benzii. Ambele caracteristici sunt standardizate.

Tensiunea maximă în bandă se calculează cu relația:



$$S_{max} - S_{min} \geq \sum F_i$$

în care  $F_i$  reprezintă forțele rezistente pe traseul de transport. Pe de altă parte este cunoscută relația:

$$S_{max} = S_{min} e^{\mu\alpha}$$

unde  $\mu$  este coeficientul de frecare între bandă și suprafața tamburului de acționare care variază între aproximativ 0,1 și 0,4, iar  $\alpha$  este unghiul de înfășurare a benzii pe tambur.

Din relațiile de mai sus se poate determina tensiunea maximă în bandă:

$$S_{max} = K \sum F_i \frac{e^{\mu\alpha}}{e^{\mu\alpha} - 1}, \quad K = 1 \div 1,2$$

Suma forțelor rezistente se poate calcula din puterea la axul tobei de acționare:

$$N_0 = \frac{\sum F_i \cdot v}{102} \rightarrow \sum F_i = \frac{102 \cdot N_0}{v}$$

puterea  $N_0$  fiind dată în kW, iar viteza transportorului,  $v$ , în m/s.

Numărul de inserții rezultă din condiția la limită:

$$S_{max} \leq \sigma \cdot B \cdot z \rightarrow z \geq \frac{S_{max}}{\sigma \cdot B}$$

în care  $\sigma$  este rezistența admisibilă a benzii pe unitate de lățime, iar  $B$  este lățimea benzii.

### *Rolele și tamburii*

Rolele se pot construi din oțel, fontă, materiale plastice sau lemn. Tamburii transportorului se construiesc din oțel sau fontă. Tamburul de acționare poate fi căptușit cu cauciuc sau materiale pentru mărirea coeficientului de frecare cu banda. Lungimea rolelor și a tamburilor depinde de lățimea benzii.

$$B_{r,t} = B + (50 \div 100) \text{ mm}$$

Diametrul celor doi tamburi depinde, în general, de grosimea benzii sau de numărul de inserții, la cele din cauciuc fiind:

$$D_a = (125 \div 150) z$$

$$D_i = (60 \div 100) z$$

Rolele se pot dispune în plan sau în jgheab, așa cum se observă în figura 1.3:

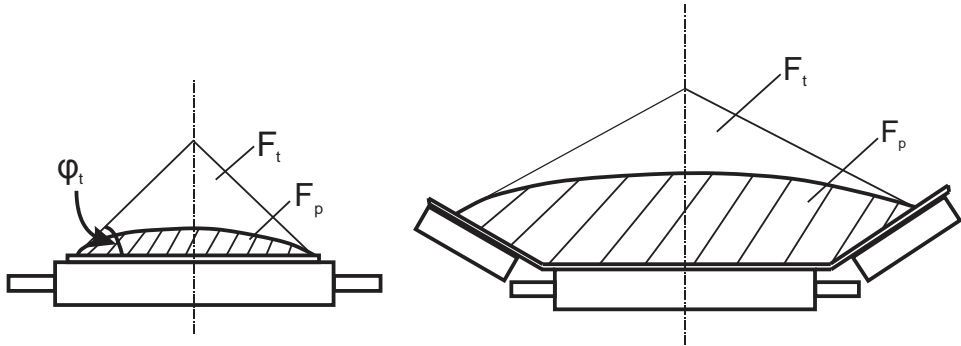


Figura 1.3. Dispunerea rolor

Distanța dintre role ( $l$ ) se alege în funcție de densitatea materialului transportat, iar pe ramura liberă între 2500 – 3000 mm.

Tabelul 1.1. Distanțe dintre role

$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$l$ [mm]
< 1000	1750 $\div$ 0,625 $B$
1000 $\div$ 1500	640 $\div$ 0,625 $B$
1500 $\div$ 2000	550 $\div$ 0,625 $B$

#### *Dispozitive de încărcare și descărcare*

Încărcarea materialelor pe bandă se poate realiza cu ajutorul unei pâlnii sau prin cădere liberă. Pentru a evita distrugerea benzii datorită

sarcinilor dinamice în zona de încărcare, rolele se dispun mai des pe o distanță de 1 – 2 m. Descărcarea se poate face intermediar cu dispozitive cu scut, spre exemplu, sau pe la capăt unde se montează de regulă o capotă de descărcare care se profilează după traiectoria maximă și minimă,  $T_M$  și  $T_m$ , pentru a se evita prăfuirea și distrugerea scutului.

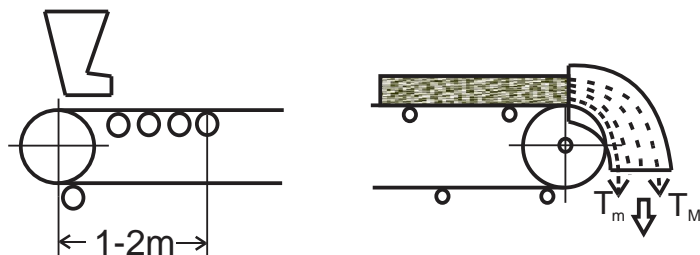


Figura 1.4. Dispozitive de încărcare și descărcare

## 1.2.2. Calculul transportoarelor cu bandă

### 1.2.2.1. Productivitatea

În cazul transportului materialelor mărunte productivitatea se calculează cu relația:

$$M_h = F_p \cdot v \cdot \rho \cdot 3600$$

$$M_h = F_t \cdot \varphi \cdot v \cdot \rho \cdot 3600$$

$$M_h = \frac{B^2}{4} \operatorname{tg} \rho_t \cdot \varphi \cdot \rho \cdot v \cdot 3600$$

având ca unitate de măsură kg/h.

Cu ajutorul acestei formule se poate calcula lățimea benzii:

$$B = \sqrt{\frac{M_h}{900 \operatorname{tg} \rho_t \cdot \varphi \cdot \rho \cdot v}}$$

Valoarea practică a lățimii este:  $B_b = \frac{B}{0,8}$

În formulele de mai sus  $\rho_t$  este unghiul de taluz natural al materialului,  $\rho$  este densitatea materialului în  $\text{kg/m}^3$ , iar  $v$  este viteza de transport care poate să fie de maxim 1 – 2 m/s. Coeficientul de umplere,  $\varphi$ , se poate alege din tabelul de mai jos în funcție de condițiile de transport.

Tabelul 1.2. Valori ale coeficientului de umplere

Natura materialului	Condiții de transport	
	Favorabile	Nefavorabile
Bucăți	0,6	0,3÷0,4
Mărunt	0,75	0,4÷0,5

În cazul funcționării în plan înclinat productivitatea se reduce conform formulei:

$$M_i = M_0(1 - 0,02\beta)$$

$\beta$  fiind unghiul de înclinare al transportorului.

În cazul în care sunt transportate sarcini unitare, productivitatea se calculează cu relația:

$$M_h = \frac{m}{a} \cdot v \cdot 3600$$

unde  $m$  este masa sarcinii unitare, iar  $a$  este pasul de dispunere a sarcinilor pe transportor.

1.2.2.2. Puterea de antrenare

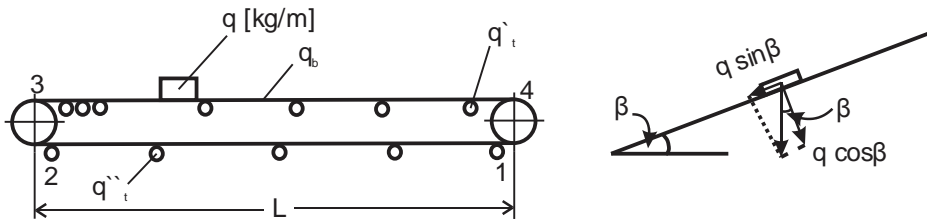


Figura.1.5. Reprezentarea grafică a mărimilor necesare calculului puterii de antrenare pentru o bandă transportoare

Rezistența la deplasare pe ramura încărcată este:

$$F_1 = (q + q_b + q_r') L \cos\beta w \pm (q + q_b) L \sin\beta = (q + q_b + q_r') L_0 w \pm (q + q_b) H$$

iar pe ramura liberă:

$$F_2 = (q_b + q_r'') L \cos\beta w \pm q_b L \sin\beta = (q_b + q_r'') L_0 w \pm q_b H$$

unde  $q_i$  sunt încărcări specifice,  $L_0$  - lungimea de transport pe orizontală, iar  $H$  - înălțimea de transport.

Coeficientul de rezistență  $w$  se poate considera  $0,03 \div 0,04$  sau se poate calcula cu formula:

$$w = c \frac{\mu d + 2k}{D}$$

în care:

$\mu$  - coeficientul de alunecare în fusul rotelor

$k$  - coeficientul de frecare la rostogolire

$d$  - diametrul fusului

$D$  - diametrul rolei

Forța de întindere este:  $F_i = S_2 + S_3$

Forța de acționare:  $F_a = S_{max} - S_{min} + 0,02 (S_{max} + S_{min})$

unde tensiunile se calculează:

$$S_1 = S_{min}$$

$$S_2 = S_1 + F_2$$

$$S_3 = (0,05 \div 0,1) S_2$$

$$S_4 = S_3 + F_1 = S_{max}$$

Puterea de acționare la tobă se calculează:

$$N = \frac{F_a \cdot V}{102}$$

Ca și unități de măsură se folosesc:  $N$  [kW],  $F_a$  [kgf],  $V$  [m/s].

### 1.3. Transportoare cu lanțuri

Transportoarele cu lanț pot fi cu plăci sau cu racleți și se folosesc atât pentru transportul sarcinilor unitare, cât și pentru cele mărunte. Lanțul este organul de tracțiune și poate aluneca pe o cale de alunecare sau este prevăzut cu role pentru rostogolire.

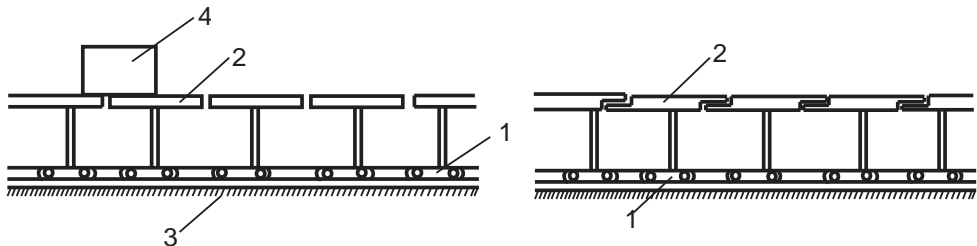


Figura 1.6. Transportor cu lanțuri: 1 – lanț; 2 – plăci; 3 – cale de alunecare; 4 – sarcină de transportat

Productivitatea acestui tip de transportoare se poate calcula cu formulele:

$$a) \text{ sarcini unitare: } M_h = \frac{m}{a} \cdot v \cdot 3600 \quad \left[ \frac{kg}{h} \right]$$

$$b) \text{ material mărunț: } M_h = F_t \cdot \varphi \cdot v \cdot \rho \cdot 3600 \quad [kg/h]$$

În cazul în care se transportă materiale mărunte viteza recomandată este de  $0,1 \div 0,5$  m/s, iar în cazul sarcinilor unitare de  $0,3 \div 0,5$  m/s. Ca și în

cazul transportorului cu bandă, puterea de antrenare se poate calcula analitic sau utilizând o serie de formule empirice.

O reprezentare simplificată a transportorului cu racleți se regăsește în figura 1.7:

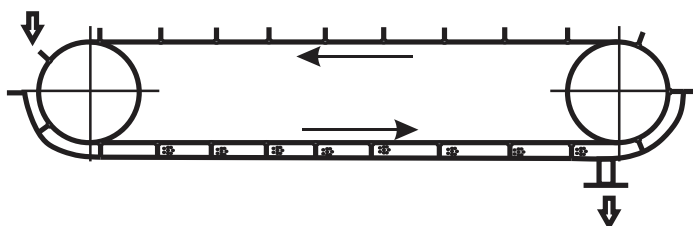


Figura 1.7. Schema de construcție a unui transportor cu racleți

Lanțul (1) de care se prind o serie de plăcuțe sau racleți (2) rulează pe două roți stelate (3) (una de întindere și una de acționare), materialul deplasându-se în jgheabul (4). Acest transportor se poate utiliza și pentru transportul sarcinilor unitare.

Productivitatea transportorului cu racleți se poate calcula cu formula:

$$M_h = F_t \cdot \varphi \cdot v \cdot \rho \cdot c \cdot 3600 = b \cdot h \cdot \varphi \cdot v \cdot \rho \cdot c \cdot 3600 \text{ [kg/h]}$$

în care:

$b, h$  = dimensiunile unui racleț (lățime, înălțime), [m]

$\varphi$  = coeficient de umplere (0,5÷0,8)

$v$  = viteza de transport (0,5÷1 m/s)

$c$  = coeficient care depinde de unghiul de înclinare cu orizontala ( $\beta$ ) a transportorului

Tabelul 1.3. Valori ale coeficientului  $c$

$\beta$ , grad.	10	15	20	30
$c$	0,85	0,7	0,65	0,5

Puterea de antrenare se calculează cu formula:

$$N = k \cdot \frac{M_h}{367 \cdot \eta} (L\omega + H) \quad [kW]$$

unde:

$M_h$  = productivitatea, t/h

$L$  = lungimea de transport, m

$H$  = înaltimea de transport, m

$\omega$  = coeficient de rezistență care poate fi ales din tabelul următor:

Tabelul 1.4. Valori ale coeficientului de rezistență

$M_h$ , t/h	4,5	9	18	27
Rostogolire*	2,25	1,7	1,3	1,1
Glisare**	4,2	3,0	2,25	1,9

\*  $\pm 50\%$  pentru materiale abrazive;

\*\*  $\pm 20\%$  pentru materiale abrazive.

#### 1.4. Transportoare cu role

Acest tip de transportoare pot fi încadrate în grupa transportoarelor cu organe rigide și se folosesc în general pentru transportul sarcinilor individuale. Un astfel de transportor este reprezentat schematic în figura 1.8.

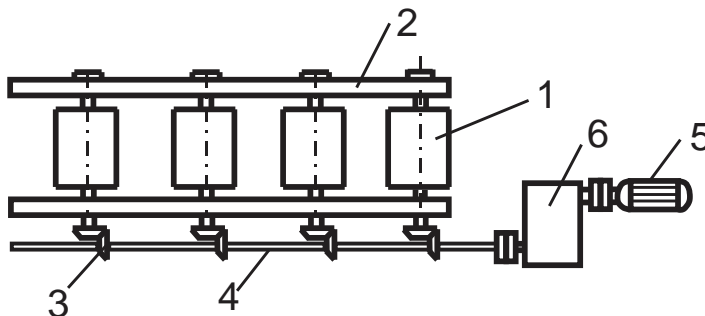


Figura 1.8. Transportor cu role



Un astfel de transportor este constituit din rolele (1) montate pe un cadru metalic (2), antrenate prin intermediul unor angrenaje cu roți dințate conice (3) de la un ax comun (4) prin intermediul unui motor (5) și a unui reductor (6). Productivitatea transportoarelor cu role se calculează cu formula:

$$M_h = \frac{m}{a} \cdot v \cdot 3600 \quad \left[ \frac{kg}{h} \right]$$

### 1.5. Transportorul cu melc

Se utilizează pentru transportul materialelor mărunte. Transportul se realizează prin rotirea unui melc (1) în interiorul unei cuve (2). Antrenarea melcului se realizează cu un motor (3) prin intermediul unui reductor (4) (figura 1.9).

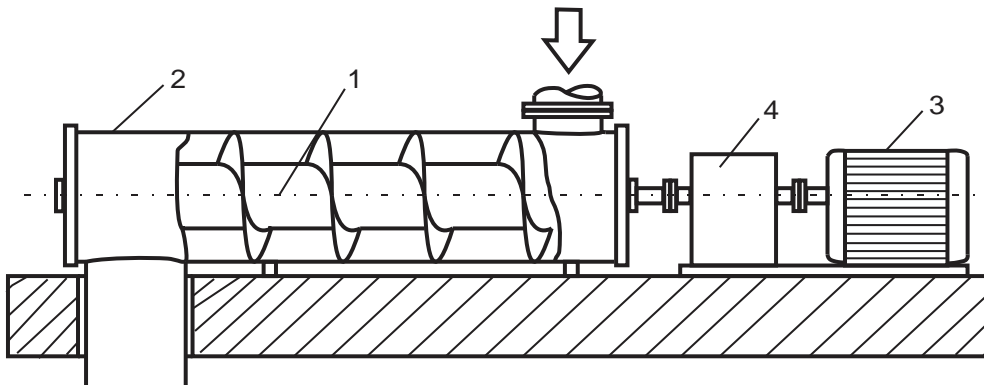


Figura 1.9. Construcția transportorului cu melc

Productivitatea transportorului cu melc poate fi calculată astfel:

$$M_h = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \varphi \cdot s \cdot n \cdot \rho \cdot 60 \cdot c = \frac{\pi D^3}{4} \frac{s}{D} \cdot \varphi \cdot n \cdot \rho \cdot 60 \cdot c \quad [kg/h]$$

în care:

$D$  = diametrul jgheabului (0,1÷0,6 m)

$s$  = pasul spirei melcului ( $s/d = 0,3\div 0,7$ )

$n$  = turația melcului

$\varphi$  = coeficient de umplere (0,15÷0,4)

$c$  = coeficient care depinde de unghiul de înclinare cu orizontala ( $\beta$ ) a transportorului.

Tabelul 1.5. Valori ale coeficientului  $c$

$\beta, ^\circ$	0	5	10	15
$c$	1	0,9	0,8	0,7

Putrerea de antrenare se calculează cu formula:

$$N = k \cdot \frac{M_h}{367\eta} (Lw + H) \quad [kW]$$

$$n_{\max} = \frac{k}{\sqrt{D}}$$

$$k = \begin{cases} 60 - \text{materiale moi} \\ 45 - \text{materiale semiabrazive} \\ 30 - \text{materiale abrazive} \end{cases}$$

$$w = \begin{cases} 1,3 - \text{materiale moi} \\ 2,5 - \text{materiale semiabrazive} \\ 4 - \text{materiale abrazive} \end{cases}$$

## 1.6. Instalații pentru transportul pneumatic

Acest tip de instalații sunt utilizate pentru transportul materialelor granulare sau pulverulente și, rar, pentru transportul sarcinilor unitare de dimensiuni mici. Sunt caracterizate prin exploatare simplă, traseu

independent de restul instalațiilor, încărcare și descărcare multiplă. Ca dezavantaje pot fi amintite consumul specific mare de energie și posibilitățile de degradare a materialului în timpul transportului.

Instalațiile pneumatice de transport pot funcționa:

- prin aspirație
- prin refulare
- în sistem mixt

așa cum se poate observa în figura 1.10.

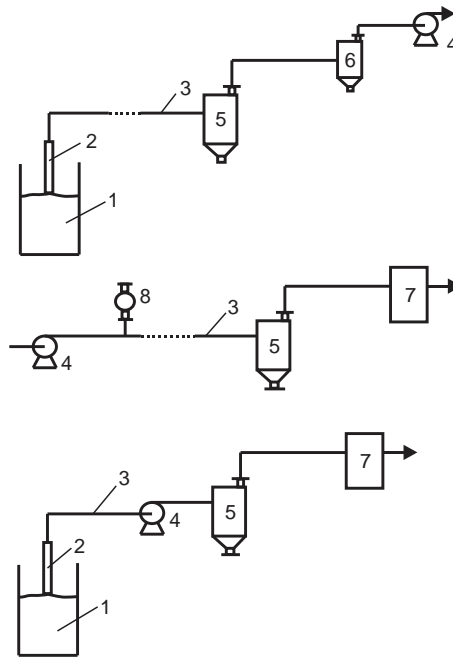


Figura 1.10. Instalații de transport pneumatic: 1 – rezervor material; 2 – alimentator tip sorb; 3 – conducte de transport; 4 – suflantă; 5 – ciclon separator; 6 – ciclon purificator; 7 – filtru de aer; 8 – alimentator cu roată celulară.

### 1.6.1. Viteza de plutire

Viteza de plutire este viteza minimă pe care trebuie să o aibă aerul pentru a realiza echilibrul forței de gravitație cu forța determinată de presiunea dinamică (forța ascensională  $F_a$ ).

$$F_a = G$$

$$\frac{\pi D_p^2}{4} \cdot \Psi \cdot \rho_a \cdot \frac{v_a^2}{2} = \frac{\pi D_p^3}{6} \cdot \rho_m \cdot g \rightarrow v_p = v_a = \sqrt{\frac{4 D_p \cdot \rho_m \cdot g}{3 \cdot \Psi \cdot \rho_a}}$$

Pentru particule nesferice se consideră un diametru echivalent:

$$D_e = \sqrt[3]{\frac{6v}{\pi}} = 1,24 \sqrt[3]{v}$$

### 1.6.2. Dispozitive anexe

Dispozitivele anexe cele mai importante sunt dispozitivele de alimentare. Cele mai utilizate sunt alimentatoarele tip sorb (figura 1.11 a) și alimentatoarele dozatoare cu tambur celular sau roată celulară (figura 1.11 b).

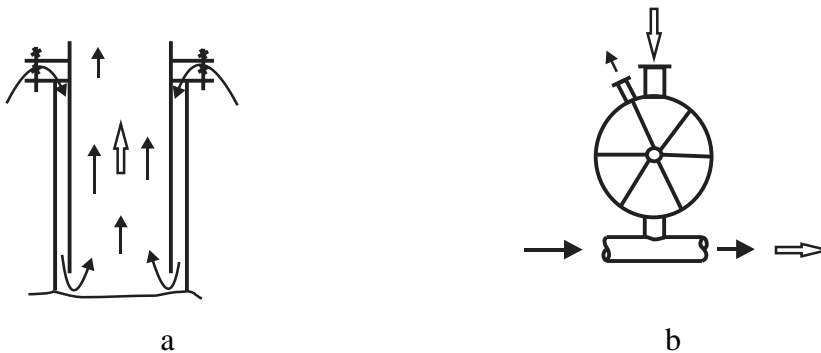


Figura 1.11. Alimentator de tip sorb (a) și alimentator dozator cu roată celulară (b)

## Capitolul II. MAȘINI PENTRU AMESTECARE ȘI MALAXARE

### 2.1. Introducere

În majoritatea proceselor de prelucrare a polimerilor se adaugă și alte substanțe, fie pentru a reduce prețul de cost sau pentru a conferi produselor proprietăți de utilizare. Dintre substanțele auxiliare adăugate menționăm:

- materiale de umplură;
- plastifianți;
- stabilizatori;
- coloranți;
- adezivi;
- produse de antistatizare;
- agenți ignifugi;
- agenți de depandare, etc.

Amestecul dintre polimer și substanțele auxiliare trebuie să fie omogen pentru a asigura buna funcționare a proceselor de prelucrare și pentru a conferi proprietățile așteptate.

În figura 2.1 se dă schema din care se deduce domeniul malaxării și al amestecării polimerului cu auxiliari solizi.

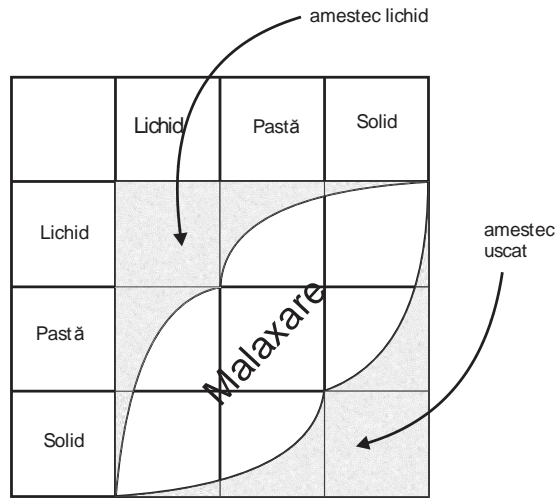


Figura 2.1. Schema de amestecare și malaxare

În capitolul acesta vor fi tratate numai mașini mașinile utilizate pentru amestecare și malaxare, utilizate frecvent în prelucrarea polimerilor.

În principiu, ambele operații se realizează prin următoarele metode:

- mecanice;
- pneumatice;
- cu elemente statice.

*Componentul minor* – este componentul care se găsește în cantitatea cea mai mică.

*Amestecarea simplă* – reprezintă creșterea distribuției până la cea mai mică particulă, fără reducerea dimensiunilor acestora. Se realizează dificil la paste mai ales, dar mai ușor la solide, uscate în special.

*Amestecarea dispersivă* – reduce dimensiunile agregatului de substanță auxiliară cu modificarea poziției. Ca exemplu ar putea fi menționate particulele de negru de fum care se amestecă cu cauciucul.

*Amestec perfect sau uniform* – este acel amestec la care probele de dimensiuni mici au aceeași compoziție. O particulă este înconjurată de alte particule de material diferit.

*Amestecul ideal* – are particulele de component minor distribuite complet întâmplător.

*Scara de examinare* – se referă la dimensiunile probelor luate din amestec în raport cu mărimea ultimelor particule.

*Textura* – este structura unui amestec la o scară mare de examinare, în comparație cu dimensiunile ultimelor particule.

*Scara de segregare* – caracterizează dimensiunile agregatelor de component minor neomogenizate.

### 2.1.1. Amestecare simplă laminară

Amestecarea simplă laminară este calea cea mai simplă de realizare a amestecării polimerilor cu substanțele auxiliare (amestecarea prin creșterea turbulenței ar cere un mare consum de energie). Datorită laminării grosimea striaiților scade (după Mohr).

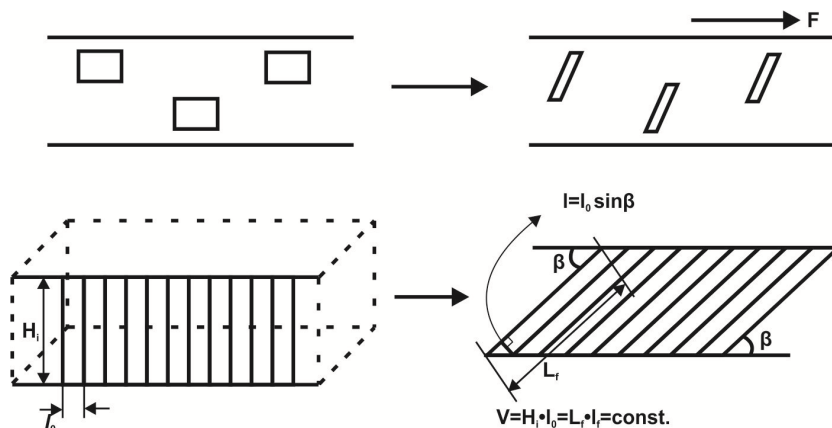


Figura 2.2. Exemplu de amestecare simplă laminară

Alt exemplu de amestecare simplă laminară este amestecarea unor granule solide prin antrenare de către un cilindru exterior mobil (figura 2.3).

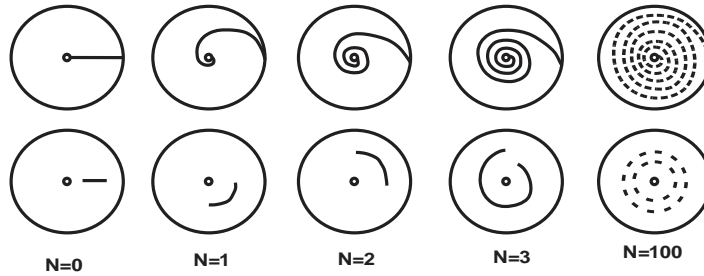


Figura 2.3. Amestecarea simplă laminară a granulelor solide de către un cilindru exterior mobil

### 2.1.2. Amestecarea dispersivă

Amestecarea dispersivă se realizează în două faze:

- desprinderea particulelor de component minor din agregat;
- dispersarea particulelor în componentul major.

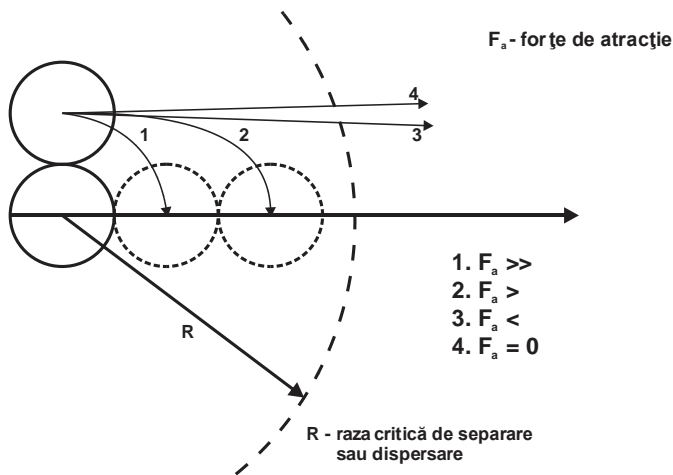


Figura 2.4. Amestecarea dispersivă



### 2.1.3. Mecanismul amestecării

După Lacey avem trei mecanisme posibile:

- a) amestecare convectivă (transferarea grupurilor de particule dintr-un loc în altul);
- b) Amestecare difuzivă;
- c) Amestecarea prin forfecare.

### 2.1.4. Măsurarea amestecării

Aprecierea amestecării se realizează cu ajutorul coeficientului de neuniformitate, definit prin:

$$k = \frac{100}{c_0} \sqrt{\frac{\sum (c_i - c_0)^2 n_i}{n-1}}$$

în care:

$c_i$  – concentrația unui component în probe;

$c_0$  – concentrația în amestec;

$n$  – numărul total de probe;

$n_i$  – număr de probe în grupe de valori identice.

De asemenea, amestecarea se mai poate aprecia din eroarea standard relativă la valoarea medie:

$$k_1 = \frac{100}{c_m} \sqrt{\frac{\sum (c_i - c_m)^2}{n-1}}$$

### 2.1.5. Clasificarea amestecătoarelor

După **modul de funcționare**, amestecătoarele se pot clasifica în:

- amestecătoare continue;

- amestecătoare discontinue.

După **natura componentelor constructive**, amestecătoarele se împart în:

- amestecătoare cu tobă rotativă;
- amestecătoare cu organe interne;
- amestecătoare pneumatice;
- amestecătoare cu elemente statice, etc.

Vom trata în cele ce urmează mai multe tipuri de amestecătoare, atât continue cât și discontinue.

## 2.2 Amestecătoare cu tobă rotativă

Aceste tipuri de amestecătoare se folosesc în general pentru materiale solide sau solide cu cantități mici de lichide. Există mai multe scheme de principiu, o parte din ele fiind prezentate în figura 2.5.

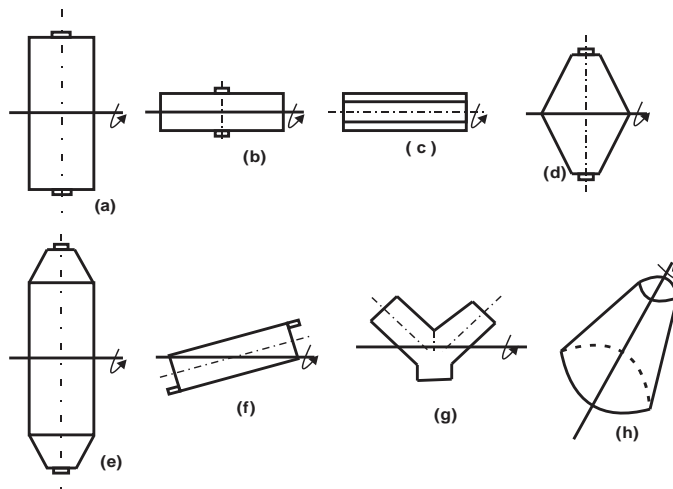


Figura 2.5. Scheme de principiu ale amestecătoarelor cu tobă: amestecătoare cilindrice (a, b, c); amestecătoare prismatice (d); amestecătoare biconice (e); amestecătoare cilindrice înclinate (f); amestecătoare bicilindrice (g); amestecătoare tip ciupercă (h).

În figura 2.6 este redată schema de construcție a unui amestecător cu tobă rotativă.

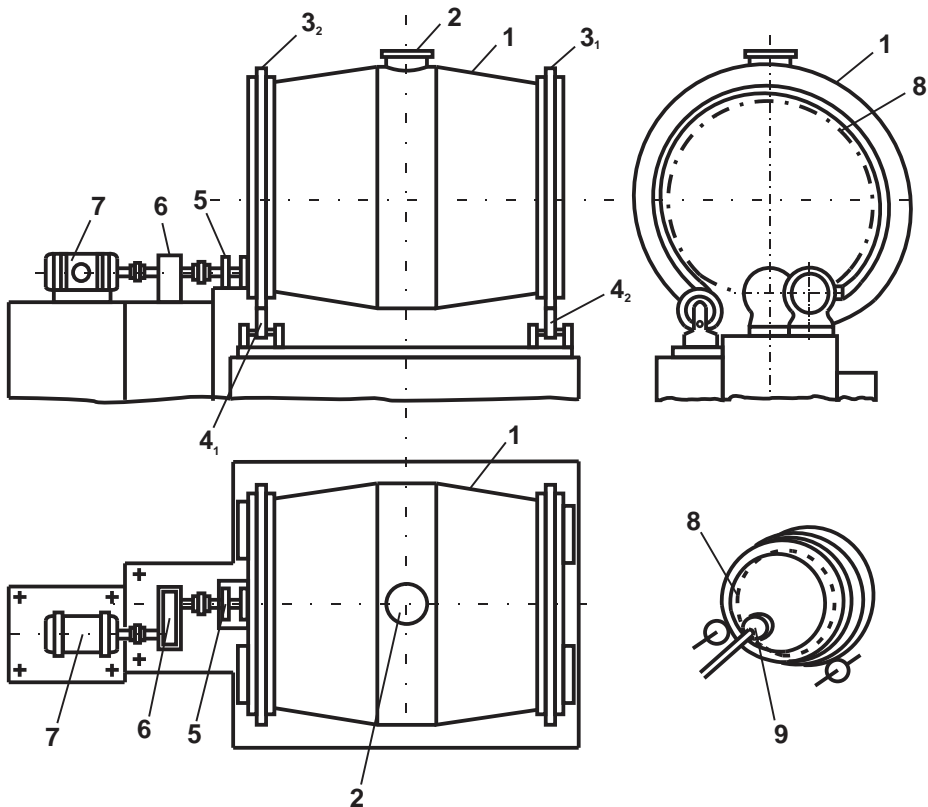


Figura 2.6. Construcția amestecătorului cu tobă rotativă biconică: 1 – tobă biconică; 2 – gură de alimentare; 3 – bandaje de rulare; 4 – role de rostogolire; 5 – lagăre; 6 – reductor; 7 – motor; 8 – coroană de acționare; 9 – pivoale de acționare.

Caracteristicile tehnice ale amestecătoarelor cu tobă rotativă sunt date în tabelul 2.1.

Tabelul 2.1. Caracteristici tehnice ale amestecătoarelor cu tobă

Parametri	Valoarea la încărcare	
	1,5 tone	3,0 tone
Turația tobei, rot/min	7,5	7
Puterea, kW	4	8
Turația motorului, rot/min	1450	1450
Raport de reducere al reductorului	36,5	30,7
Dimensiunile de gabarit ale tobei, m (Lxlxî)	4,6x1,5x1,9	5,7x2,0x2,6

## 2.2.1 Calculul amestecătoarelor cu tobă rotativă

### 2.2.1.1 Productivitatea

Productivitatea amestecătoarelor cu tobă rotativă se calculează cu formula:

$$M_h = \frac{V_t \cdot \varphi \cdot \rho \cdot 60}{\frac{m}{n} + t_i + t_d} \quad [\text{kg/h}]$$

în care:

$V_t$  – volumul tobei, m<sup>3</sup>;

$\varphi$  – coeficient de umplere (0,15 – 0,5);

$\rho$  – densitatea materialului, kg/m<sup>3</sup>;

$m$  – numărul de amestecări;

$n$  – turația tobei, rot/min;

$t_i$  – timpul de încărcare, min;

$t_d$  – timpul de descărcare, min.

Turația optimă se poate determina cu relația:

$$n_{opt} = \frac{k}{(d^{0,47} \cdot \varphi^{0,14})}$$

în care:

$d$  – diametrul tobei, m;

$\varphi$  – coeficient de umplere;

$k = 168$  (rostogolire)

$k = 222$  (aruncare)

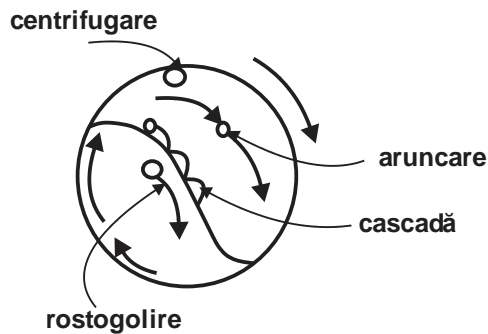


Figura 2.7. Comportamentul materialului într-un amestecător cu toabă rotativă

### 2.2.1.2 Puterea de antrenare

Puterea de antrenare se calculează cu formula:

$$N = (N_1 + N_2 + N_3) \frac{1}{\eta} \quad [\text{kw}]$$

în care:

$N_1$  – puterea consumată pentru învingerea frecărilor în lagăre;

$N_2$  – puterea necesară ridicării materialului până la înălțimea corespunzătoare unghiului de taluz natural;

$N_3$  – puterea necesară pentru ridicarea materialului la înălțime peste unghiul de taluz natural și amestecarea acestuia;

$\eta$  – randamentul total.

$$N_1 = \frac{(M_t + f \cdot M_m) \cdot r_f \cdot \omega \cdot g}{1000} \quad [\text{kw}]$$

$M_t$  – masa tobei, kg;

$M_m$  – masa materialului, kg;

$f$  – coeficient de frecare la alunecare;

$r_f$  – raza fusului arborelui tobei, m;

$\omega$  – viteza unghiulară a tobei, rad/s;

$g$  – accelerația gravitațională,  $\text{m/s}^2$ .

$$N_2 = \frac{M_m \cdot R_0 (1 + \cos \varphi_n) \cdot \omega \cdot g}{1000 \cdot \varphi_n} \quad [\text{kw}]$$

$R_0$  – distanța centrului de greutate a materialului față de axa de rotație, m;

$\varphi_n$  – unghiul de taluz natural, rad;

$$N_3 = \frac{M_m \cdot R_0 \cdot \sin \varphi \cdot \omega \cdot g}{1000} \quad [\text{kw}]$$

$\varphi$  – unghiul de rotație al vectorului  $R_0$  față de axa verticală de simetrie a tobei.

Factorul de amestecare pentru o rotație a tobei se calculează cu relația:

$$m = \frac{R^2 - r^2}{\Psi \cdot R^2}$$

unde:

$R$  – raza exterioară a tobei, m;

$r$  – raza până la care se încarcă toba, m;

$\Psi$  – coeficient de umplere.

Pentru alimentări și descărcări continue avem:

$$\varphi = \frac{V_a + V_d}{2 \cdot V_t} \cdot \frac{\tau}{60}$$

$V_a$  – debitul de alimentare, m<sup>3</sup>/h;

$V_d$  – debitul de descărcare, m<sup>3</sup>/h;

$V_t$  – volumul tobei, m<sup>3</sup>;

$\tau$  – timpul de staționare, minute.

$$\tau = \frac{L \cdot \sin \varphi_n}{2\pi \cdot R \cdot n \cdot \alpha}$$

$L$  – lungimea tobei, m;

$R$  – raza tobei, m;

$\alpha$  – unghiul de înclinare al tobei față de orizontală;

$n$  – turația tobei, rot/min.

## 2.3 Amestecătoare cu organe interne

Organele interne sau organele de lucru la aceste amestecătoare pot fi:

- melc orizontal;
- bandă;
- palete;
- brațe;
- melc vertical;
- melci planetari;
- cu elice, etc.

### 2.3.1 Amestecătorul cu melc orizontal

Acest tip de amestecător se utilizează pentru amestecarea materialelor pulverulente uscate prin deplasarea radială, orizontală și/sau verticală (figura 2.8).

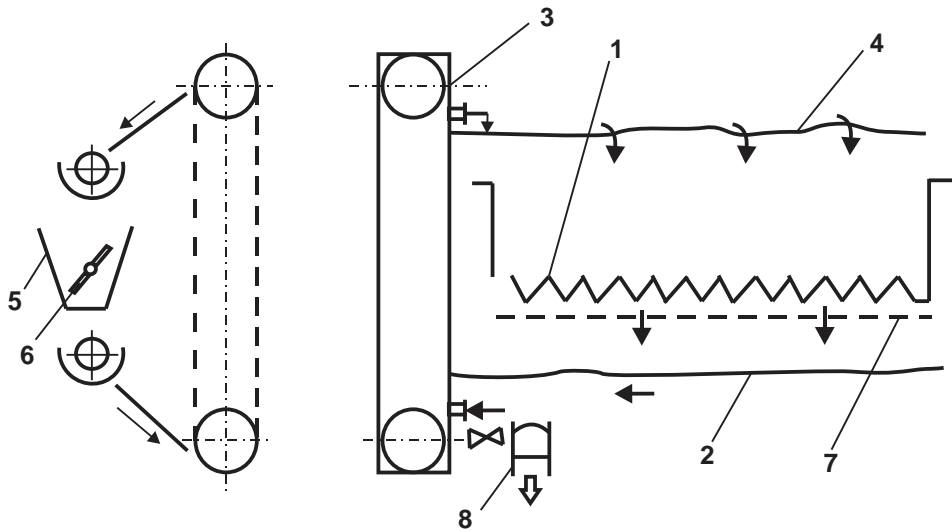


Figura 2.8. Schema amestecătorului cu melc orizontal: 1 – alimentator; 2 – melc inferior; 3 – elevator cu cupe; 4 – melc superior; 5 – buncăr; 6 – agitator; 7 – grătar; 8 – gură de descărcare.

În continuare va fi descris funcționarea acestui tip de amestecător. Prin închiderea grătarului (7), buncărul (5) se umple cu ajutorul alimentatorului (1) cu diferite materiale pulverulente. După terminarea încărcării, grătarul se deschide și materialul se amestecă cu ajutorul agitatorului (6). Astfel, melcul inferior (2) refulează materialul în elevatorul cu cupe (3) care alimentează melcul (4) care-l transportă în buncărul (5), de unde cade pe melcul inferior (2) și operația se repetă. Amestecul omogen se descarcă prin gura de descărcare (8).



### 2.3.1.1 Calculul amestecătorului cu melc orizontal

Productivitatea se calculează cu formula:

$$M_s = \frac{M_{v_s} \cdot \rho}{m + 2} \quad [\text{kg/s}]$$

$M_{v_s}$  – productivitatea melcului,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$\rho$  – densitatea materialului,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$m$  – numărul trecerilor materialului prin amestecător pentru a atinge gradul de amestecare dat.

$$M_{v_s} = \frac{D^2 - d^2}{8} \cdot S \cdot \omega \cdot \varphi \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$D$  – diametrul exterior al melcului, m;

$d$  – diametrul miezului melcului, m;

$S$  – pasul melcului;

$\omega$  – turația melcului,  $\text{rad}/\text{s}$ ;

$\varphi$  – coeficient de umplere (0,3 – 0,4 pentru melc orizontal; 0,75 pentru melcul vertical).

Puterea de antrenare se calculează cu formula:

$$N = \frac{M_s L g}{1000} (w_0 \cos \alpha + \sin \alpha) \quad [\text{kw}]$$

$M_s$  – debitul de material,  $\text{kg}/\text{s}$ ;

$L$  – lungimea melcului, m;

$g$  – accelerația gravitațională,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;

$w_0$  – coeficient de rezistență (1,2 – 4, în funcție de proprietățile materialului; pentru materialele abrazive se majorează cu 20 – 40%);

$\alpha$  – unghiul de înclinare al melcului față de orizontală, grade.

### 2.3.2 Amestecătoare cu bandă

Aceste amestecătoare sunt formate din:

- cuva cu gură de încărcare și descărcare;
- axul cu bandă elicoidală continuă sau discontinuă;
- sistemul de acționare.

Organul activ al acestor amestecătoare este banda fixată pe ax (figura 2.9).

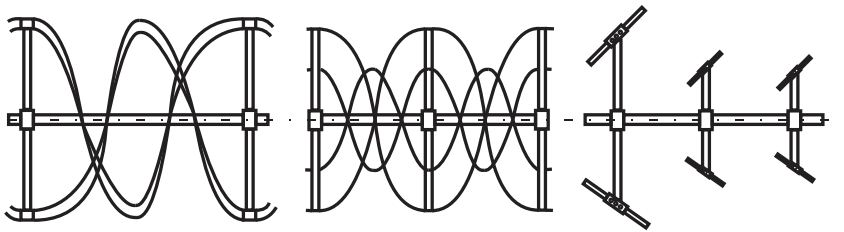


Figura 2.9. Exemple de bandă elicoidală fixată pe ax

Eficacitatea amestecării depinde de turația axului, înclinarea benzii sau a paletelor, dimensiunea benzii, coeficientul de umplere al cuvei, etc.

În tabelul 2.2 se dau caracteristicile tehnice ale amestecătoarelor cu bandă „Progres” (URSS).

Tabelul 2.2. Caracteristicile tehnice ale amestecătoarelor cu bandă „Progres”

Parametru	Valoarea pentru $V_{cuvă}$ , m <sup>3</sup>			
	3	10	30	70
Starea produsului	Materiale pulverulente		Materiale fibroase	
Presiunea în cuvă, kgf/cm <sup>2</sup>	1		0,7	0,5
Turația arborelui, rot/min	35,4	26	25	12,7
Presiunea în manta, kgf/cm <sup>2</sup>	1		2,5	
Puterea la arbore, KW	15	40	10,8	
Dimensiuni gabaritice, m (lungime x lățime x înălțime)	3,4x1,5x2,6	6,3x2,7x2,5	10x2,3x2,5	13,8x3,3x3,8
Masa, tone	3,1	8,0	13,7	29,1

Materialul de construcție al acestor amestecătoare este în funcție de natura materialelor supuse amestecării. Cuvă amestecătorului se calculează la presiune sau la vid, după procesul tehnologic al amestecării.

Pentru amestecuri cu vâscozitate mai mare, precum și pentru malaxarea unor paste foarte vâscoase (care cer cupluri de amestecare mari) se utilizează amestecătorul cu două axe și cu palete demontabile (figura 2.10).

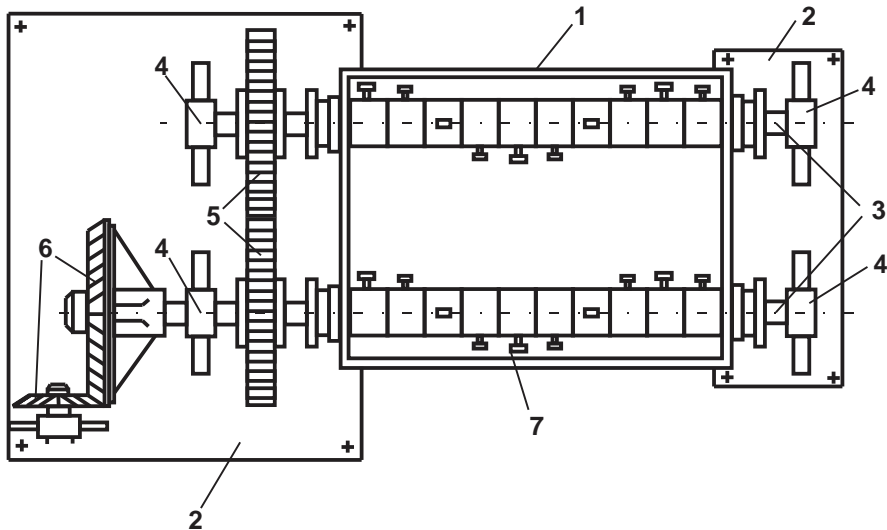


Figura 2.10. Amestecător cu două axe și cu palete demontabile: 1 – cuva; 2 – plăci fundație; 3 – axe; 4 – lagăre; 5 – roți dințate cilindrice; 6 – roți conice; 7 – palete fixate pe butuci.

### 2.3.3 Malaxorul centrifugal

Malaxorul centrifugal se construiește în mai multe variante, una din acestea este redată foarte simplificat în figura 2.11.

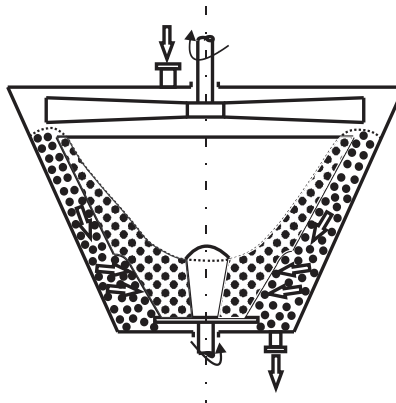


Figura 2.11. Malaxor centrifugal

Partea de lucru a malaxorului este un corp tronconic prevăzut cu fante la partea inferioară prin care materialul poate să circule în circuit închis datorită forței centrifuge creată de rotor. Paleta superioară realizează efectul de malaxare.

### **2.3.4 Amestecătoarele cu melci verticali și planetari**

Aceste tipuri de amestecătoare sunt redată schematic în figurile 2.12 și 2.13. Se folosesc pentru amestecarea polimerilor sub formă de pulbere.

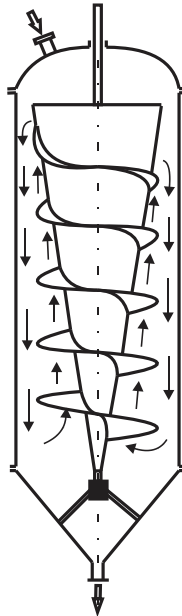


Figura 2.12. Amestecător cu melc vertical

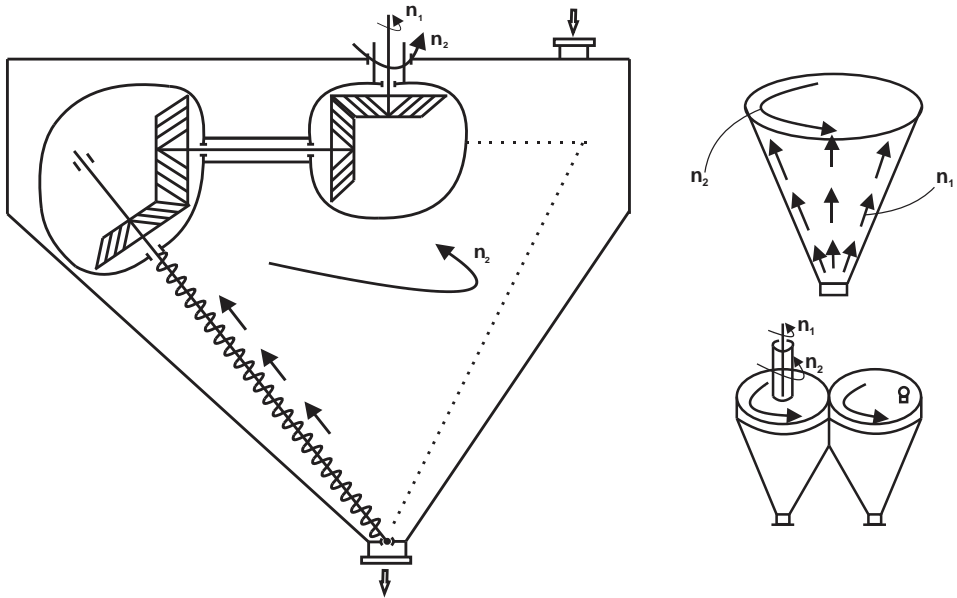


Figura 2.13. Amestecător cu melci planetari

În cazul amestecătorului cu melci planetari, mișcarea de rotație a melcului în jurul axului produce o deplasare axială a materialului și deci o amestecare locală. Mișcarea de revoluție a melcului produce o amestecare în întreg volumul aparatului. La amestecătorul cu doi melci, acționarea trebuie să se facă de la același motor pentru a se împiedica distrugerea acestora (când unul dintre ei este în mișcare, iar al doilea este oprit).

### 2.3.5 Amestecătorul intensiv și cel rapid

Aceste tipuri de amestecătoare se folosesc de asemenea pentru amestecarea pulberilor de polimeri în general. Ambele aparate pot lucra la vid, la presiune, cu încălzire sau răcire, motiv pentru care ele sunt prevăzute cu manta (figurile 2.14 și 2.15).

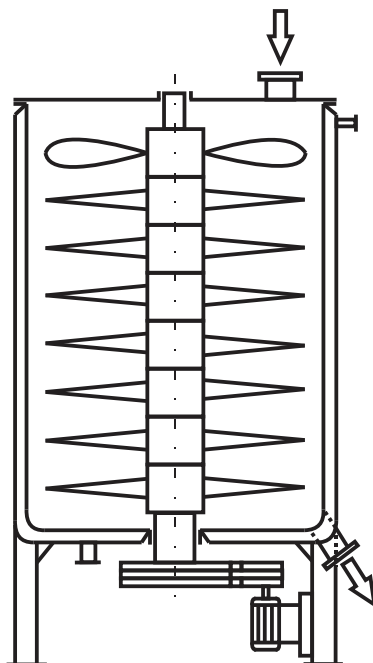


Figura 2.14. Amestecător intensiv

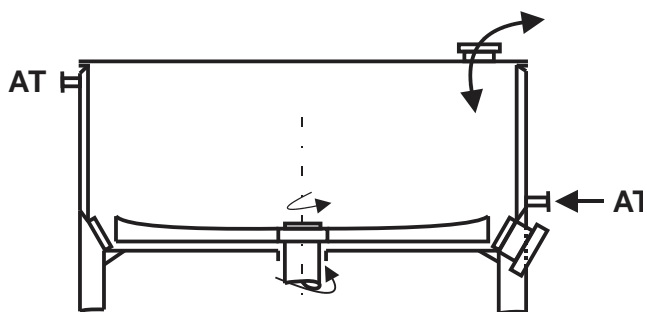


Figura 2.15. Amestecător rapid (secțiune simplificată)

### 2.3.6 Amestecătorul centrifugal cu impact

Acest tip de amestecător poate să funcționeze continuu, realizează amestecarea și mărunțirea materialului prin accelerarea acestuia și lovirea de niște știfturi (3) mobile și fixe montate pe rotorul (1), respectiv, pe carcasa (2) (figura 2.16).

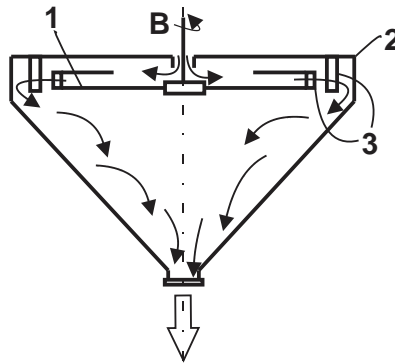


Figura 2.16. Amestecător cu impact

### 2.3.7 Amestecătoare pneumatice

Acestea se utilizează pentru amestecarea materialelor solide care nu se încarcă electrostatic. Se caracterizează prin simplitatea construcției și productivitatea ridicată (figura 2.17). Pentru limitarea antrenării, diametrul la partea superioară se mărește sau se elimină agentul de fluidizare printr-un ciclon.



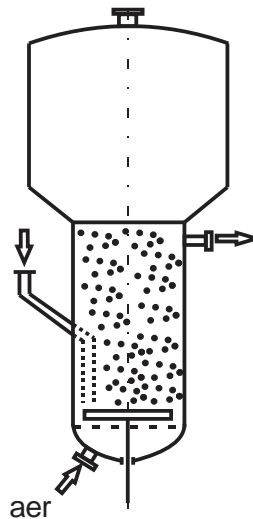


Figura 2.17. Amestecător pneumatic

## 2.4 Malaxoare

Malaxoarele sunt aparate utilizate pentru amestecarea unor substanțe cu vâscozitate mare. Se utilizează, în general, pentru omogenizarea unor amestecuri sub formă de paste sau cu vâscozitate deosebit de mare (amestecul de cauciuc și negru de fum, etc.). Ele pot să fie de tip ușor sau greu. Malaxoarele ușoare (colergangurile sau malaxoarele cu brațe în formă de Z) se folosesc pentru amestecarea pastelor sau topiturilor de polimeri cu unele substanțe auxiliare în stare solidă. Malaxoarele grele se folosesc în general (malaxoarele cu rotoare) pentru operații în care pot să apară chiar și destrucții mecanice.

Colergangurile, deși depășite la ora actuală, prezintă un anumit interes prin modul de lucru și posibilitatea de utilizare pentru malaxarea anumitor amestecuri (spre exemplu cele în care există componenți fibroși).

Din punct de vedere constructiv, malaxoarele pot fi:

- cu cuvă rotativă și cilindri fixi;

- cu cuvă fixă și cu cilindri mobili;
- cu cuva și cilindri mobili în sensuri opuse.

În figura 2.18 se prezintă o schemă simplificată a unui colergang cu cilindri mobili.

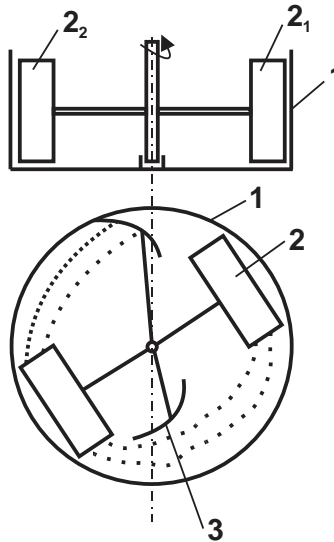


Figura 2.18. Construcția (simplificată) a unui colergang: 1 – cuva (fixă); 2 – cilindri; 3 – racleți.

Caracteristicile colergangului sunt:

$$D_{cilindri} = 1 - 3 \text{ m};$$

$$M_{cil} = 1 - 3 \text{ t};$$

$$n_{cil} = 15 - 30 \text{ rot/min};$$

$$N = 10 - 25 \text{ KW}.$$

Omogenizarea se realizează prin strivire și frecare.

### 2.4.1 Malaxoare cu brațe duble

Aceste malaxoare se folosesc pentru amestecarea lichidelor cu vâscozitate mare, pentru malaxarea pastelor, pentru prepararea materialelor plastice armate, a cauciucului, etc.

Omogenizarea se realizează prin:

- întindere;
- frământare;
- sfășiere, etc.

Brațele acestor malaxoare sunt de forme foarte variate, în funcție de natura amestecului supus malaxării.

În figura 2.19 se dă schema de construcție a unui malaxor cu două brațe în formă de Z.

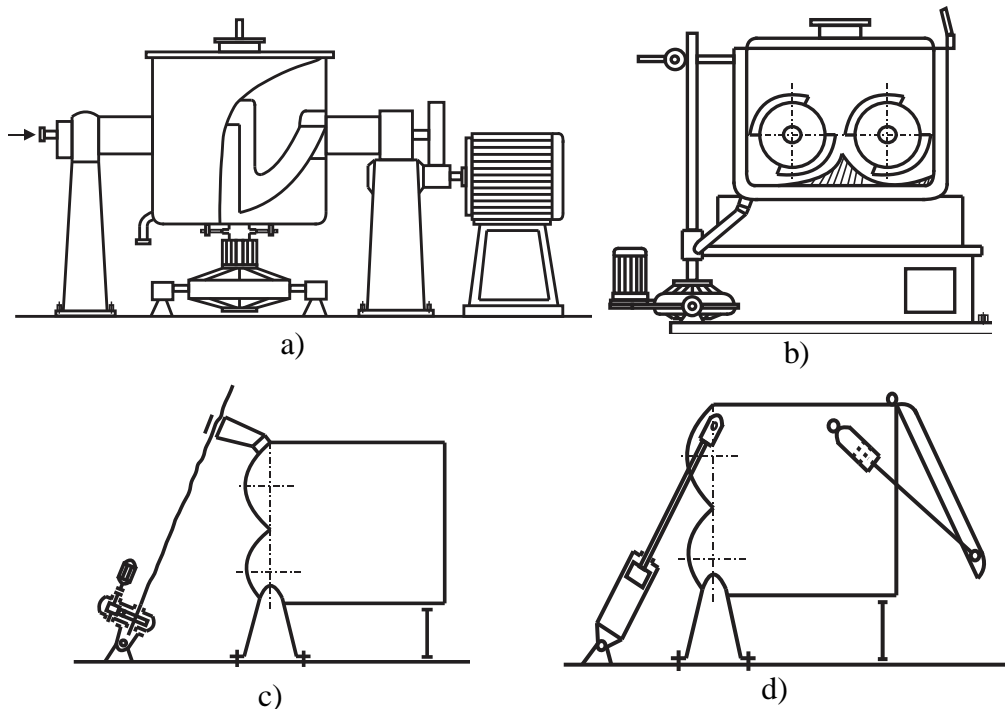


Figura 2.19. Malaxor cu brațe: a, b – schema de construcție; c, d – mecanismul de descărcare electric și hidraulic

Acționarea malaxoarelor este o problemă foarte importantă datorită momentelor mari care trebuie transmise.

După cum se vede din figura 2.20, acționarea pe la un singur capăt se caracterizează prin transmiterea unui moment neuniform. În schema (b) avem moment uniform la primul braț, iar în schema (c) momentul este uniform la ambele brațe.

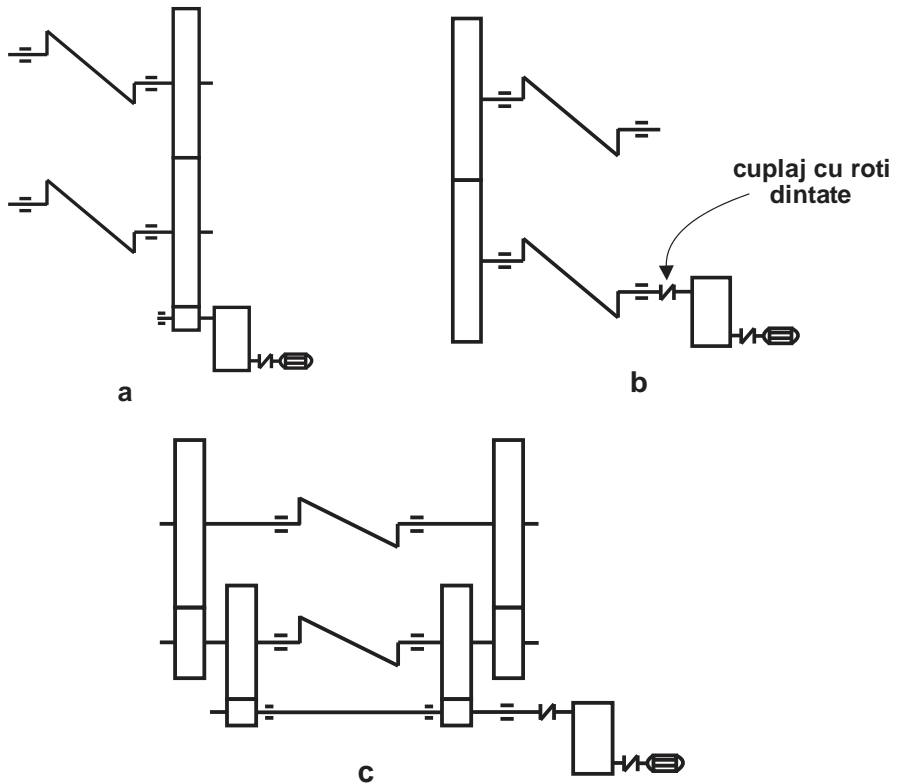


Figura 2.20. Acționare malaxoarelor cu brațe

### 2.4.2 Malaxoare cu rotoare

La aceste malaxoare organele active – rotoarele ocupă până la 60% din volumul camerei de lucru. Se mai numesc și malaxoare închise sau malaxoare interne și sunt destinate malaxării amestecurilor foarte vâscoase (cum sunt cauciucurile sau alte amestecuri de mase plastice).

Malaxarea se realizează mai ales prin acțiunea forțelor de forfecare dintre organele active și material sau între material și pereții interiori ai camerei de lucru. Tipic pentru acest tip de malaxor este malaxorul Banbury. Camera de malaxare poate fi încălzită sau răcită cu ajutorul unei mantale sau prin țevi montate în pereți. Durata operației de malaxare este în funcție de natura materialului prelucrat. În figura 2.21 este prezentată schema de construcție a unui astfel de malaxor.

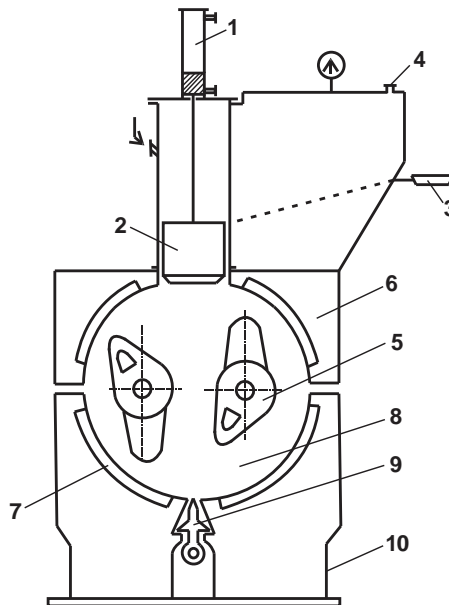


Figura 2.21. Schema de construcție a malaxorului Banbury: 1 – cilindru hidraulic pentru acționarea pistonului de închidere (2); 3 – cupă basculantă pentru introducerea materialelor solide; 4 – vizor; 5 – rotoare; 6 – carcasă; 7 – cameră de temperaturare; 8 – cameră de malaxare; 9 – obturator; 10 – batiu.

Organele de lucru ale malaxorului sunt rotoarele care pot fi de forme diferite după cum se observă și din figura 2.22.

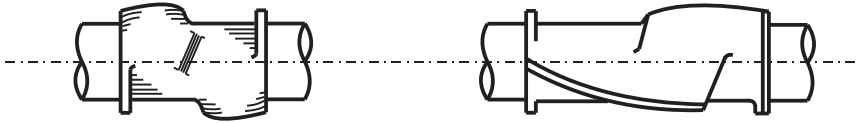


Figura 2.22. Rotoare de malaxor Banbury

În tabelul 2.3 se dau câteva caracteristici ale malaxoarelor Banbury.

Tabelul 2.3. Caracteristici tehnice ale malaxoarelor Banbury

Volumul total al camerei de lucru	l	29	58	260	300
Volumul util al camerei de lucru	l	20	40	185	210
Masa șarjei de cauciuc ( $\varphi = 1,9$ )	kg	18	36	170	190
Masa șarjei de PVC ( $\varphi = 1,4$ )	kg	28	55		
Turația normală a rotoarelor față/spate	rot/min	30/33	24,5/28	19/21	19/21
Puterea la turația normală	KW	75	150	460	600
Greutatea (fără reductor și motor)	kg	7500	9800	27000	32200

Aționarea malaxoarelor cu rotoare se poate face după mai multe scheme, așa cum rezultă și din figura 2.23.

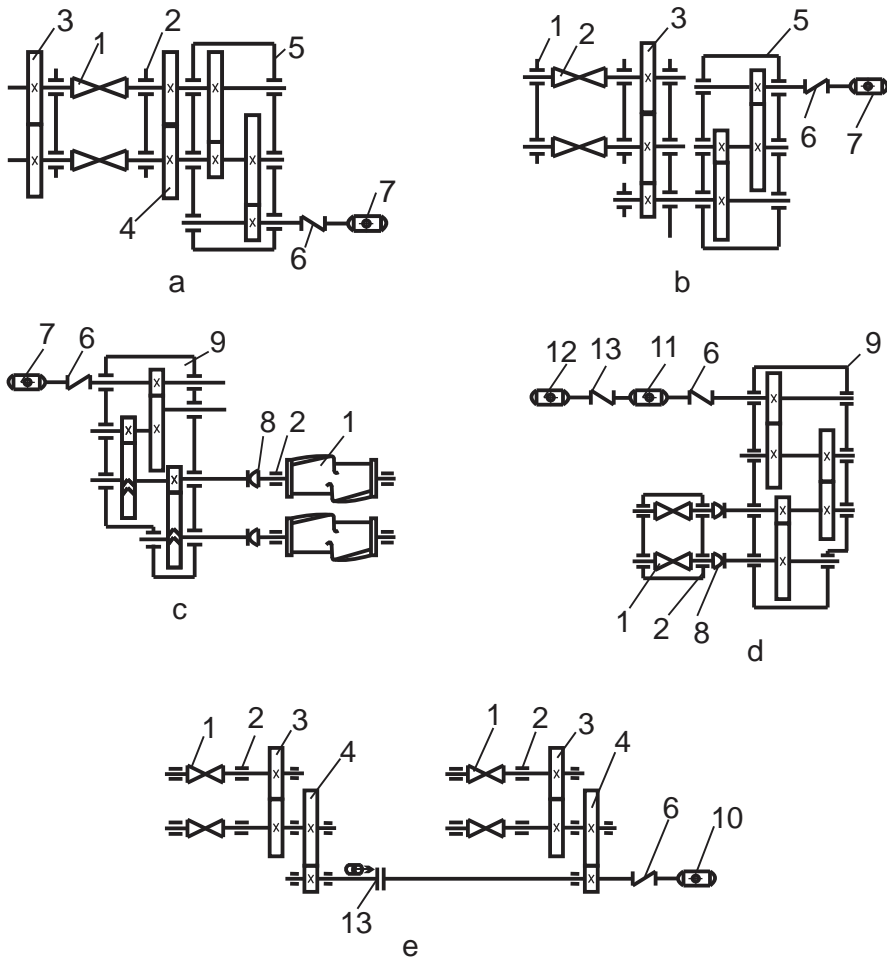


Figura 2.23. Scheme de acționare a malaxoarelor cu rotoare. 1 – rotoare; 2 – lagăre; 3, 4 – roți dințate; 5 – reductor cu roți cilindrice; 6 – cuplaj elastic; 7 – motor de curent alternativ; 8 – cuplaj sferic; 9 – reductor bloc; 10 – motor sincron; 11 – motor de curent continuu de putere mică; 12 – motor de putere mare; 13 – cuplaj pneumatic automat.

### 2.4.3 Calculul malaxoarelor

#### 2.4.3.1 Productivitatea

$$M_h = 60 \cdot \frac{V\varphi\rho}{t} \quad [\text{kg/h}]$$

$V$  – volumul amestecului,  $\text{m}^3$ ;  
 $\rho$  – densitatea amestecului,  $\text{kg/m}^3$ ;  
 $\varphi$  – coeficientul de utilizare a mașinii;  
 $t$  – durata ciclului de amestecare.

#### 2.4.3.2 Puterea de antrenare

Pentru malaxoarele cu brațe se poate utiliza următoarea formulă:

$$N = nz b \sin \alpha (1 + f \cdot ctg \alpha) \left[ (R^3 - r^3) (0,0009 f R n^2 - 0,24) + 0,086 f R (R^2 - r^2) \right] \quad [\text{w}]$$

în care:

$n$  – turația axelor rotoarelor, rot/min;  
 $z$  – numărul brațelor;  
 $f$  – coeficient de frecare dintre material și metal;  
 $R$  – raza brațului, m;  
 $r$  – raza axului, m;  
 $b$  – lățimea brațelor, m;  
 $\rho$  – densitatea materialului prelucrat,  $\text{kg/m}^3$ ;  
 $\alpha$  – unghiul de înclinare al brațelor, grade.

Raza brațului se determină cu formula:

$$R = \sqrt[3]{\frac{M}{12,6\varphi\rho}}$$

în care:



$M$  – masa șarjei, kg;

$\rho$  – densitatea, kg/m<sup>3</sup>;

$\varphi$  – coeficientul de umplere.

Dimensiunile cuvei se recomandă:

$$L = 4,25R; l = 0,42R; h = 0,5R; s = 0,75R$$

În cazul malaxoarelor interne se utilizează formula:

$$N = 0,2k \left( \frac{\pi n_m}{60} \right)^{n+1} \left\{ \left[ l_1 (0,5^{n+1} + 0,865^{n+1}) + 2l_2 0,705^{n+1} \right] F + \left( \frac{D}{k_0} \right)^{n+1} h_0 \delta (l_1 + l_2) \right\} \quad [w]$$

în care:

$n_m$  – turația medie a rotoarelor, rot/min;

$l_1, l_2$  – lungimea crestei lungi și scurte a rotoarelor, m;

$D$  – diametrul crestei rotorului pe muchie, cm;

$F$  – coeficient care se calculează cu relația:

$$F = \sum_{i=1}^n \left( \frac{D_c}{h_i} - 2 \right)^{n+1} f_i$$

$i$  – numărul elementelor pe care se distribuie volumul deformat sau lățimea zonei de deformare a materialului în spațiul dintre rotor și cameră;

$D_c$  – diametrul interior al camerei de amestecare, cm;

$h_i$  – distanța între creasta rotorului și cameră pentru elementul  $i$ ;

$f_i$  – suprafața secțiunii elementului  $i$ , cm<sup>2</sup>.

Valorile funcției  $F$  se dau și în tabele (vezi Bernhardt), în care:

$h_0$  – distanța dintre muchia crestei rotorului și cameră, cm;

$\delta$  – lățimea crestei, cm;

$k, n$  – constantele reologice ale materialului amestecat.

După Bernhardt, puterea necesară se poate calcula și cu formula:

$$N = A \cdot \mu Q^2 \frac{L}{h^3} \left( = A \mu \frac{U^2 L}{h} \right)$$

în care:

$N$  – puterea pe unitatea de lungime a rotorului;

$A$  – 4 pentru rotoare cu muchii paralele cu axul camerei și 15,5 pentru rotoare cu muchii înclinate;

$\mu$  – vâscozitatea dinamică;

$L$  – lățimea crestei rotorului;

$h$  – distanța minimă dintre rotor și cameră;

$Q$  – debitul volumic pe unitatea de lungime de rotor;

$U$  – viteza periferică a rotoarelor.

## Capitolul III. VALȚURI ȘI CALANDRE

### 3.1. Introducere

În acest capitol vor fi tratate mașinile de prelucrat polimeri cu doi sau mai multi cilindri. Cele cu doi cilindri, denumite valțuri, se utilizează în general în operațiile de pregătire a materialelor pentru a fi prelucrate în continuare în vederea obținerii unor produse finite prin calandrare, extrudere, presare, etc.

Valțurile și calandrelle sunt mașini cu o mare diversitate constructivă rezultată din funcțiile ulterioare pe care le pot îndeplini. Astfel, valțurile se pot folosi pentru:

- omogenizarea polimerilor;
- vulcanizarea cauciucului;
- preîncălzirea și plastifierea materialelor;
- obținerea unor semifabricate.

Calandrelle se pot utiliza pentru:

- obținerea foilor și a foliilor din materiale plastice sau din cauciuc;
- profilarea sau sagrinarea foilor sau foliilor;
- acoperirea țesăturilor cu cauciuc sau mase plastice;
- dublarea foilor și a foliilor.

De asemenea, calandrelle mai pot fi clasificate și după dispunerea relativă a cilindrului: calandrelle în I, L, U, Z, T, etc.

Dispunerea cilindrului unui calandru poate fi dictată de natura materialului alimentat și de unele probleme de echilibrare a forțelor care acționează în lagăre.

### 3.2. Principiul de realizare a operațiilor de vălțuire sau calandrare

Atât vălțuirea cât și calandrarea constau în laminarea materialului între cilindrii presați, antrenati în sensuri inverse, de regulă cu viteze diferite. În figura 3.1 este arătat principiul de realizare a operației de vălțuire. Calandrarea constă în mai multe treceri ale materialului printre perechi de cilindri.

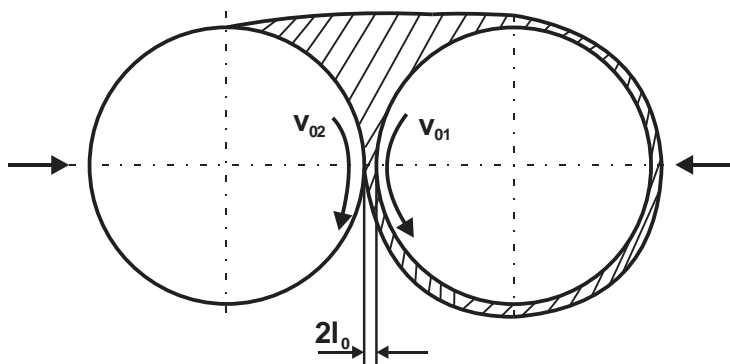


Figura 3.1. Principiul de funcționare a unui valț

De regulă vitezele periferice ale celor doi cilindri sunt diferite. Cilindrul din spate se rotește cu o viteză mai mare astfel încât materialul prelucrat se înfășoară pe cilindrul din față, valțar, unde se găsește operatorul.

Dacă raportul celor două viteze se numește fricțiune, acest raport fiind unul din cei mai importanți parametri pentru un valț sau un calandru, atunci:

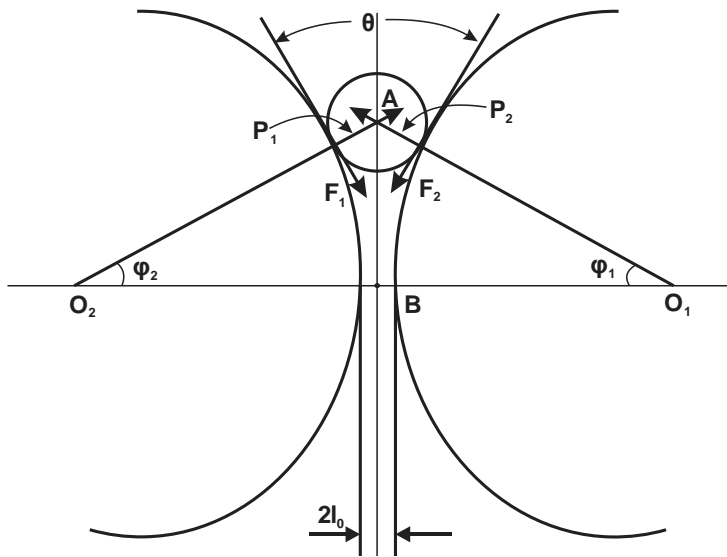
$$f_r = \frac{V_{02}}{V_{01}} = \frac{\pi D_2 N_2}{\pi D_1 N_1} \cong \frac{N_2}{N_1} \quad (3.1)$$

Fricțiunea sau coeficientul de fricțiune variază între 1 și 1,4 (rareori 2,5). Fricțiunea poate fi exprimată și în funcție de vălțuire.

$$\dot{\gamma} = \frac{V_{02} - V_{01}}{2l_0} = \frac{V_{01}}{2l_0} (f_r - 1) \quad (3.2)$$

### 3.3. Condiția de apucare a materialului între cilindri

Pentru ca materialul să fie atras spre zona de vâlțuire, rezultanta forțelor care acționează asupra unei particule de material trebuie să fie orientată spre centrul acestei zone conform figurai 3.2.



Figurai 3.2. Condiția de apucare a materialului între cilindri

$$G + F_1 \cos \varphi_1 + F_2 \cos \varphi_2 > P_1 \sin \varphi_1 + P_2 \sin \varphi_2 \quad (3.3)$$

$$\text{Dar, } D_1 = D_2 \Rightarrow \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi = \frac{\theta}{2},$$

$$F_1 = F_2 = F = \mu P = \text{tg} \alpha P \quad (3.4)$$

$$P_1 = P_2 = P$$

unde  $\theta$  este unghiul de apucare, iar  $\alpha$  este unghiul de frecare dintre material și suprafața tăbliei cilindrului.

Dacă se neglijează greutatea particulei de material se obține:

$$2F \cos \varphi > 2P \sin \varphi$$

$$2F \cos \frac{\theta}{2} > 2P \sin \frac{\theta}{2}$$

$$P \operatorname{tg} \alpha > P \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \Rightarrow \operatorname{tg} \alpha > \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \Rightarrow \theta \leq 2\alpha \quad (3.5)$$

### 3.4. Dimensionarea materialului apucat între cilindri

Din triunghiul dreptunghic  $O_2AB$  rezultă:

$$\cos \varphi = \cos \frac{\theta}{2} = \frac{O_2B}{O_2A} = \frac{R+l_0}{R+l} \Rightarrow \frac{R+l_0}{R+l} = \frac{1}{\cos \alpha}$$

$$\frac{2R+2l_0}{2R+2l} = \frac{1}{\cos \alpha} \quad (\text{dar } 2l_0 \ll 2R) \Rightarrow$$

$$1 + \frac{2l}{2R} = \frac{1}{\cos \alpha} \Rightarrow 2l = 2R \left( \frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right) \quad (3.6)$$

### 3.5. Construcția valțurilor și calandrelor

În figura 3.3 se dă schema simplificată de construcție a unui valț industrial utilizat pentru amestecarea polimerilor înaintea operației de formare.

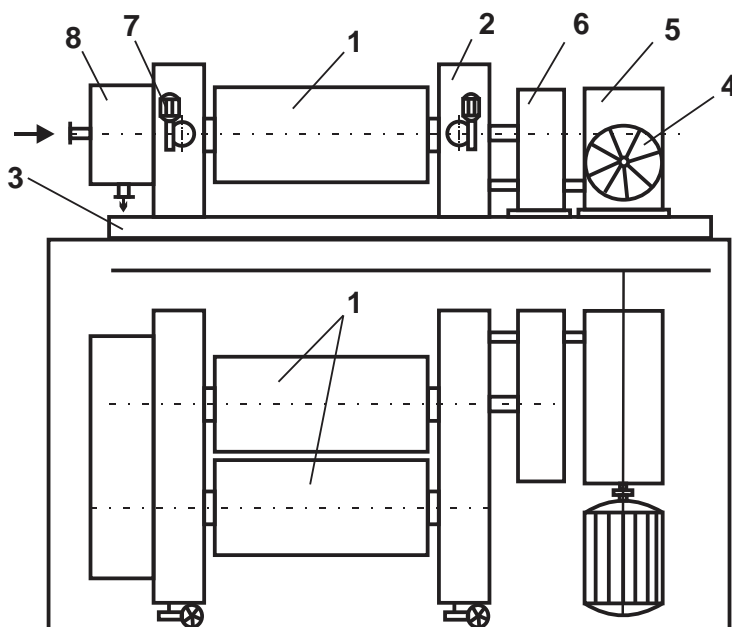


Figura 3.3. Valț de amestecare

1 – cilindri, 2 – batiuri, 3 – placă fundație, 4 – motor electric, 5 – reductor,  
6 – roți dințate, 7 – dispozitive de distanțare, 8 – cuvă

Părțile mai importante ale unui valț sau calantru sunt:

- cilindrii
- valțurile
- lagărele
- dispozitivele de reglare a distanței dintre cilindri
- dispozitivele pentru compensarea săgeții cilindrului
- partea de acționare
- dispozitivele auxiliare, etc.

### 3.5.1. Batiuri

Batiurile valțurilor și calandrelor sunt elemente pe care se montează toate celelalte părți componente. Se confecționează din fontă, de regulă, și

pot să aibă unele suprafețe prelucrate foarte fin pentru a monta dispozitivele de reglare a distanței dintre cilindri. La calandre batiurile pot fi prevăzute cu un sistem de încălzire. Batiurile se montează pe plăci de fundație.

### **3.5.2. Cilindri**

Cilindrii valțurilor și calandrelor sunt elemente active de lucru și se confecționează din fontă prin turnare în forme metalice sau cochilii sau din oțeluri aliate. Datorită procesului de turnare în forme metalice, cilindrii din fontă au la suprafața tăbliei un strat de aproximativ 15-25 mm de fontă albă cu o duritate deosebit de mare.

Cilindrii valțurilor și calandrelor trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- 1) Suprafața tăbliei să fie foarte dură și lustruită, mai ales la ultimul cilindru al calandrelor (care poate fi cromat pentru a asigura caracteristici de suprafață a produselor);
- 2) Grosimea pereților tăbliei să fie aceeași;
- 3) Suprafața interioară să fie prelucrată pentru a reduce rezistențele termice;
- 4) Rezistența la oboseală mare;
- 5) Generatoarele fusurilor și a părții de calare să fie perfect paralele cu generatoarele tăbliei;
- 6) Săgeata să fie mai mică (mai ales la calandre).

Cilindrii pot fi închiși sau deschiși după cum prin cavitatea centrală circulă un agent termic sub presiune sau prin circulație (evacuare) liberă. Cilindrii încălziți sunt de tipul închis, agentul termic circulând în regim forțat (apă sau abur) pentru a asigura un regim termic mai intens și controlat.

În figura 3.4 este redată secțiunea pe un sfert a unui cilindru cu cavitate centrală.



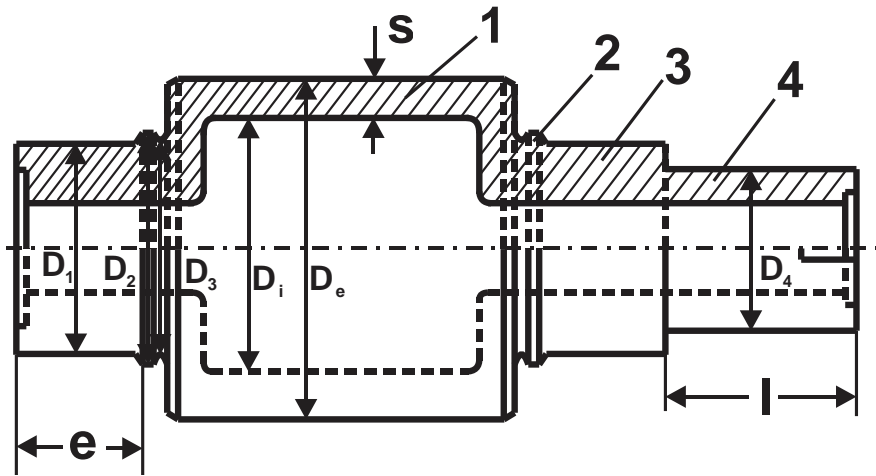


Figura 3.4. Cilindru cu cavitate interioară: 1 – tăblie, 2 – guler, 3 – fus, 4 – partea de calare

Proporții constructive:

$$D_1 = (0,65 - 0,75)D_e$$

$$e = (1 - 1,21)D_1$$

$$D_2 = (1,15 - 1,2)D_1$$

$$D_3 = 1,1D_1$$

$$D_4 = (0,85 \div 0,95)D_1$$

$$e = (1,5 \div 1,6)D_1$$

$$S \cong 100\text{mm}$$

Dimensiunile orientative ale cilindrilor valțurilor și calandrelor sunt:

	Valturi	Calandre
Diametru, D, mm	400-665	600-915
Lungimea, L, mm	1000-2200	1700-2800
L/D	2,5-3,5	2,8-3,0

În general, prelucrarea materialelor plastificate se poate face pe șasiuri cu cilindri cu coeficient de sveltețe mai mare (2,5-2,7), față de materialele dure care se prelucrează pe șasiuri cu raportul  $L/D=2-2,2$ .

În general, lungimea cilindrilor se ia mai mare cu 50-100 mm față de lățimea foliei prelucrate. Cilindrii construiți din oțeluri speciale aliate (Cu, Cr, Mo) sunt mult mai scumpi ca cei din fontă.

La calandre se folosesc cilindri cu canale periferice care au avantajul că elimină așa numitul efect de capăt care constă într-o scădere a temperaturii tăbliei datorită pierderilor de căldură prin fusuri. Acest efect este mai mare la cilindrii antrenați cu roți de fricțiune. În figura 3.5 se arată o secțiune printr-un cilindru de calandrare cu canale periferice. Acești cilindri au și dezavantajul că sunt mai flexibili, iar canalele periferice se pot bloca. Canalele periferice sunt alimentate din cavitatea centrală prin canalele radiale astfel încât primele pot fi grupate sau în paralel.

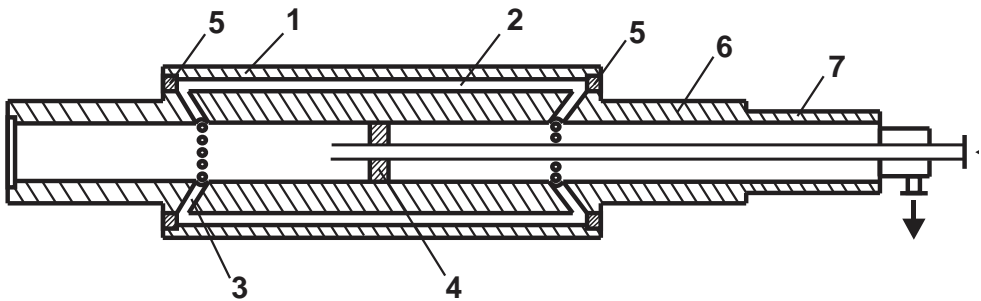


Figura 3.5. Secțiune printr-un cilindru cu canale periferice

1 – tăblia, 2 – canal periferic, 3 – canal radial, 4 – inel de etanșare, 5 – bușe de etanșare a canalelor periferice, 6 – fusuri, 7 – partea de calare.

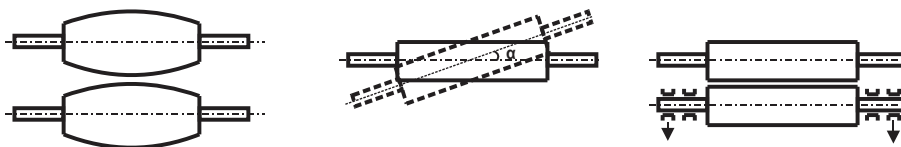
### 3.5.3. Compensarea săgeții cilindrilor

Datorită greutatei proprii și a forței de depărtare care rezultă din integrala presiunii pe zona de vâlțuire a cilindrilor vâlțurilor, dar mai ales a

calandrelor, aceștia se înconvoaie și deci formează o săgeată care este maximă la mijloc. Săgeata maximă este funcție de geometria cilindrilor și de parametrii de lucru care sunt determinați de natura materialului prelucrat și a produsului obținut.

Compensarea săgeții se realizează prin trei metode (la cilindrii valțurilor nu se realizează compensarea datorită distanței mari dintre cilindri, pe de o parte, și faptului că rareori pe aceste mașini se obțin produse finite cu proprietăți impuse în limite așa de înguste încât să fie determinate de săgeata cilindrilor):

- Bombare
- Dezaxare
- Încovoiere contrară



Bombare

Dezaxare

Încovoiere contrară

Figura 3.6 Compensarea săgeții

Compensarea prin bombare are un caracter static și este cea mai veche metodă, care nu se mai aplică la mașinile moderne. Săgeata compensată este mică, iar săgeata reală este funcție de mai mulți parametri și se poate modifica în timp. De aceea, această metodă are un caracter static.

Dezaxarea este o metodă mai modernă, dinamică și realizează corecții de până la 0,2 mm. De obicei se realizează dezaxarea la ultima pereche de cilindri. Comanda dezaxării se poate face cu tijă filetată sau cu pene. În ambele cazuri se deplasează lagărele cilindrilor.

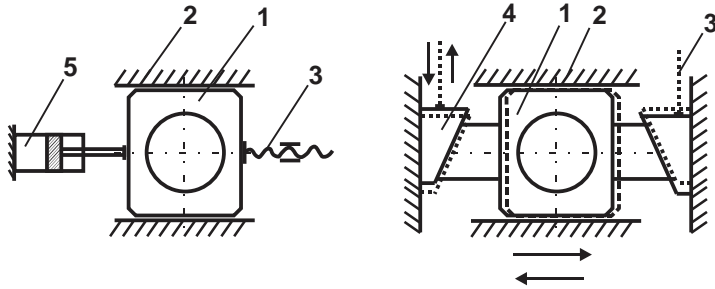


Figura 3.7. Compensarea dezaxării

1 – lagăr mobil, 2 – ghidare, 3 – tijă filetată, 4 – pene, 5 – cilindru hidraulic pentru eliminarea jocului.

Compensarea prin încovoiere contrară este metoda cea mai modernă și realizează corecții de până la 0,05 mm. Se realizează de regulă cu ajutorul unor cilindri mobili, așa cum rezultă din figura 3.8.

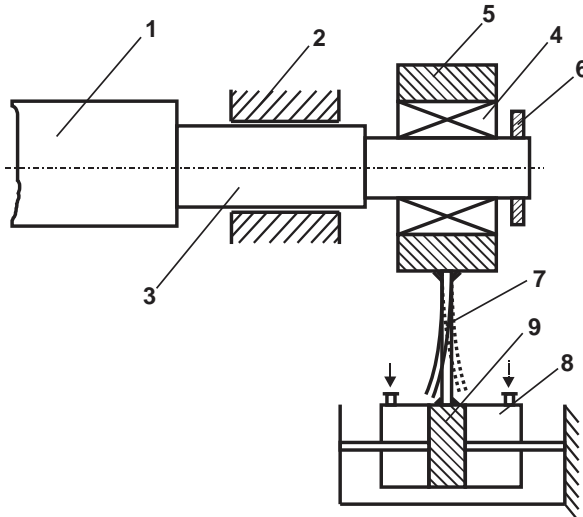


Figura 3.8. Dispozitiv pentru încovoiere contrară

1 – cilindru, 2 – lagăr cilindru, 3 – fus, 4 – lagăr suplimentar (rulment), 5 – cămașă rulment, 6 – inel de fixare, 7 – bară solidarizată cu rulmentul și cilindrul mobil, 8 – cilindru mobil, 9 – piston fix.

### 3.5.4. Lagărele valțurilor și calandrelor

Se folosesc lagăre prin fricțiune sau alunecare și rostogolire. Cele cu fricțiune sunt cu cuzineți din bronz centrifugat. Raportul L/D este în general 1. Acest tip de lagăr poate lucra la presiuni de 50-65 kg/cm<sup>2</sup> și viteze periferice de până la 1m/s. Jocul dintre fus și cuzinet este 1/1000-2/1000 din diametrul lagărului.

Reglarea distanței dintre cilindri se realizează prin amplasarea lagărelor cu ajutorul unor tije filetate comandate de la motoare electrice prin intermediul unor reductoare cu ax și roata dințată, așa cum rezultă din figura 3.9. Se pot folosi două reducății ax-roată dințată.

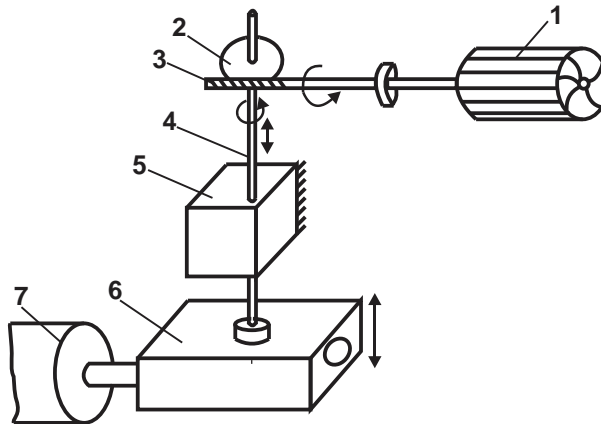


Figura 3.9. Dispozitiv de reglare a distanței dintre cilindri

1 – motor electric, 2 – roată dințată, 3 – ax melcat, 4 – tijă filetată, 5 – bucsă fixă, 6 – lagăr, 7 – cilindru

Acționarea dispozitivelor de reglare a distanței dintre cilindri se poate face:

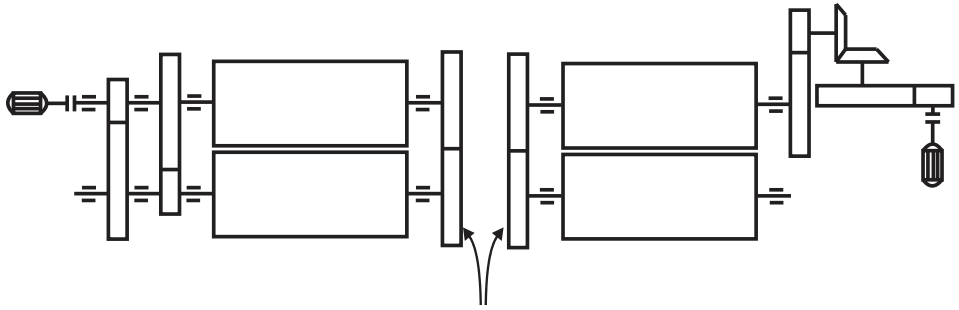
- cu motoare de curent alternativ cu număr comutabil de poli
- cu motor de curent alternativ pe care este flanșat un motor de curent continuu

Ambele sisteme permit acționarea cu viteză mai mare pe prima porțiune a cursei de reglare și cu viteză mult mai mică pe ultima porțiune. În primul caz se realizează o variație în trepte a vitezei prin schimbarea numărului de poli, iar în a doua metodă pe porțiunea finală a cursei de reglare deplasarea se realizează cu ajutorul motorului de curent continuu. Se pot realiza astfel viteze de 2 mm/minut și în final de 0,1 mm/minut.

### **3.6. Acționarea valțurilor și calandrelor**

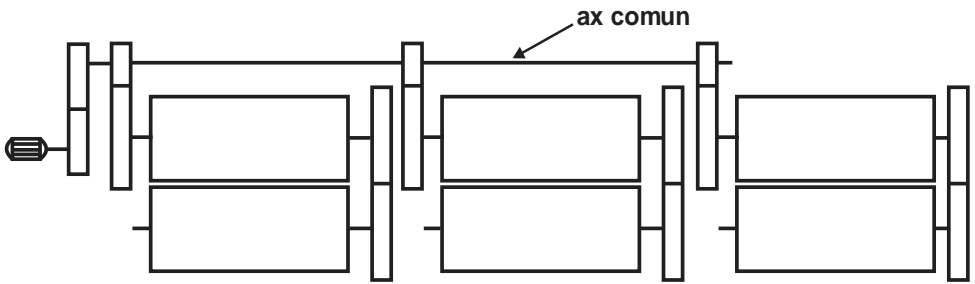
Valțurile pot fi acționate în grup sau individual. Acțiunea grupată oferă unele avantaje și poate fi realizată când mai multe valțuri cu aceleași caracteristici constructive prelucrează același material în vederea obținerii aceluiși produs finit, deci în secțiunile de prelucrare de mare capacitate.

Calandrelor sunt acționate numai individual. Deoarece viteza periferică trebuie să fie modificată în funcție de tehnologie se impune ca mai ales la calandre, cilindrii să poată fi acționați cu viteze diferite (cu viteze diferite de calandrare). Aceasta din urmă poate fi modificată cu ajutorul sistemelor de acționare cu grup Ward-Leonard sau cu motoare de curent continuu. Modificarea fricției la diferite zone de calandrare se realizează cu diferite sisteme, așa cum rezultă și din figura 3.10, în care se reprezintă sistemul pentru acționarea individuală și în grup a valțurilor și sistemul de acționare a calandrelor. După cum se vede în figura 3.10, la primele sisteme fricția nu poate fi modificată prin sistemul de acționare. Cel mai modern sistem este cel cu axe cardanice și vector de curent continuu la fiecare cilindru.



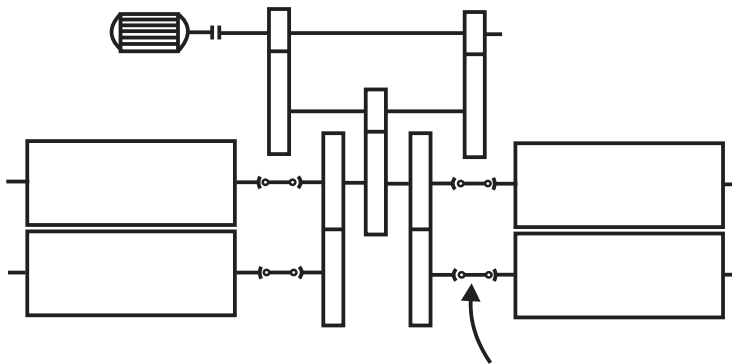
roți de fricțiune

acțiunea individuală a valțurilor



ax comun

acțiunea în grup a valțurilor



axe cardanice

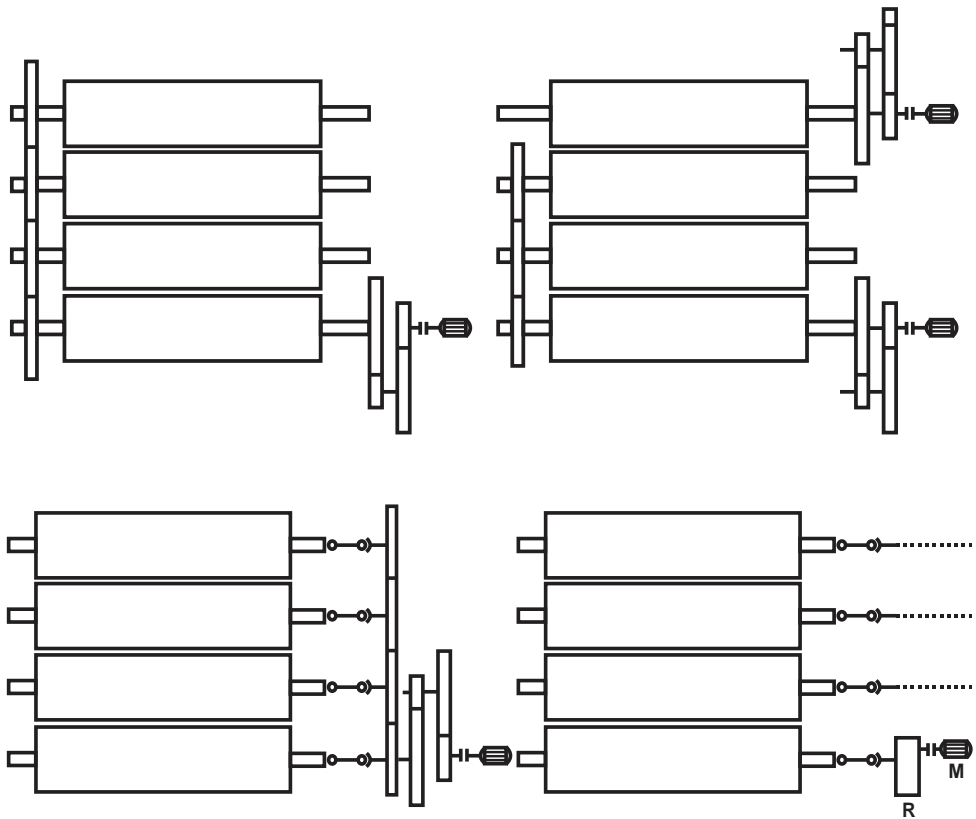


Figura 3.10. Acționarea valțurilor și a calandrelor

După cum se vede în figura 3.10, la sistemele mai vechi de acționare se utilizează roți de fricțiune (cu dinți mai lungi) pentru a transmite mișcarea de la un cilindru la altul. Acestea au dezavantajele:

- Fricțiune neuniformă
- Eforturi dinamice
- Încovoiere asimetrică
- Fricție constantă
- Efect de capăt pronunțat



Utilizarea axelor cardanice, pe de o parte, prezintă multe avantaje, dintre care menționăm:

- Cilindrii sunt mai echilibrați
- Pierderile sunt mai echilibrate, efectul de capăt mai redus
- Uzura lagărelor mai mică datorită transmiterii momentului în ax
- Schimbarea mai ușoară a cilindrilor și a altor dispozitive de pe valț sau calandru

### 3.7. Calculul puterii pentru antrenarea valțurilor și calandrelor

Pentru o zonă de vâlțuire sau calandrare se poate calcula puterea necesară de acționare cu formula:

$$P_a = \frac{P}{\eta_1 \eta_2 \cdot 1000}, [\text{kW}] \quad (3.7)$$

în care:

$P$  – puterea teoretică, W;

$\eta_1$  – randamentul de transmisie (0,96);

$\eta_2$  – randamentul roților de fricțiune (0,94).

$$P = P_u + P_l + P_d \quad (3.8)$$

în care:

$P_u$  – puterea utilă;

$P_l$  – puterea necesară învingerii rezistențelor datorită frecării în lagăre (mers în gol);

$P_d$  – puterea necesară învingerii rezistențelor în dispozitivele de distanțare a cilindrilor.

Pentru materiale care respectă legea puterii, puterea utilă se calculează în modul următor:

- a) Se calculează viteza de deformare aparentă:

$$\dot{v}_a = \frac{v_0}{l_0} \quad (3.9)$$

b) Se calculează constanta  $C$  din ecuația gradientului de presiune:

$$\frac{-}{p} = C \frac{(\zeta^2 - \lambda^2)^{\frac{1}{\varepsilon}}}{(1 + \zeta^2)^{1 + \frac{2}{\varepsilon}}} \quad (3.10)$$

$$C = 2(2 + \varepsilon)^{\frac{1}{\varepsilon}} \left(\frac{v_0}{l_0}\right)^{\frac{1}{\varepsilon}} \cdot k \cdot \sqrt{\frac{R}{2l_0}} \quad (3.11)$$

c) Se calculează  $p_{max}$  (presiunea maximă):

$$p_{max} = 2\lambda C (-\lambda^2)^{\frac{1}{\varepsilon}} \quad (3.12)$$

d) Se calculează grosimea foliei la ieșire și debitul pe unitatea de lungime:

$$2l_f = 2l \cdot (1 + \lambda_f^2) = 2l_0 (1 + \lambda^2) \quad (3.13)$$

$$M_v = 2v_0 l_0 (1 + \lambda^2) \quad (3.14)$$

e) Se calculează forța de depărtare, momentul pe unitatea de lungime și puterea utilă:

$$F = \frac{1}{2} \sqrt{2Rl_0} (\zeta_0 + \lambda) p_{max} \quad (3.15)$$

$$M = 2 \cdot LM^* = 2LRCl_0 I \quad (3.16)$$

$M^*$  - momentul pe unitatea de lungime.

$$I = \int_{\zeta_0}^{\lambda} \frac{(\zeta^2 - \lambda^2)^{\frac{1}{\varepsilon}}}{(1 + \zeta^2)^{\frac{2}{\varepsilon}}} d\zeta$$

$$P_u = M\omega = M \cdot \frac{\pi N}{30} \quad (3.17)$$

În relațiile de mai sus s-au folosit notațiile:

$v_0$  – viteza periferică a cilindrilor;  
 $l_0$  – semidistanța dintre cilindri;  
 $\varepsilon$  – inversul indicelui de curgere;  
 $k$  – indice de consistență (din legea puterii);  
 $R$  – raza cilindrului;  
 $L$  – lungimea tăbliei cilindrului;  
 $N$  – turația cilindrului.

Pentru restul notațiilor se va vedea paragraful referitor la curgerea materialelor în zona de vălțuire.

$$P_l = \frac{M_l \cdot \omega}{1000} = \frac{\sum G_{cil} \cdot 9,81 \cdot d_f \cdot \mu_f}{1000 \cdot 2} \cdot \frac{\pi \cdot N}{30}, [\text{kW}] \quad (3.18)$$

$$P_d = \frac{M_d \cdot \omega}{1000} = \frac{\sum F_i \cdot d_i \cdot \mu_f \cdot \pi \cdot N}{2 \cdot 1000 \cdot 30}, [\text{kW}] \quad (3.19)$$

în care:

$G_{cil}$  – greutatea cilindrilor;  
 $d_f$  – diametrul fusului;  
 $\mu_f$  – coeficientul de frecare la alunecare sau rostogolire;  
 $F_i$  – forțe rezistente în dispozitivul de reglare a distanței dintre cilindri.

La calandre se poate utiliza o formulă empirică pentru calculul puterii de acționare a unui cilindru:

$$P_a = kDBV, [\text{kW/cilindru}] \quad (3.20)$$

în care:

$D$  – diametrul cilindrului, m;  
 $B$  – lățimea foliei, m;  
 $V$  – viteza periferică a cilindrului, m/min.

Constanta  $k$  se ia în funcție de materialul prelucrat:

Materialul prelucrat	Valorile constantei $k$
PVC plastifiat	0,74
PVC semidur	0,96
PVC dur	1,48
PVC dur (Luwitherm)	2,50

### 3.8. Calculul productivității valțurilor și calandrelor

Productivitatea valțurilor în cazul funcționării discontinue se poate calcula cu formula:

$$M_h = (0,06 \div 0,085) \frac{DL\rho}{t}, \text{ [kg/h]} \quad (3.21)$$

în care:

D – diametrul cilindrului de înfășurare, m;

L – lungimea tăbliei, m;

$\rho$  – densitatea materialului prelucrat,  $\text{kg/m}^3$ ;

t – timpul de prelucrare, h.

În cazul funcționării continue, calculul productivității se face după o formulă care este echivalentă cu ecuația (3.21), după cum se vede din cele ce urmează:

$$M_h = S \cdot V \cdot \rho = B_b \cdot l \cdot \pi DN \rho \cdot 60, \text{ [kg/h]} \quad (3.22)$$

în care:

$B_b$  – lățimea benzii de material evacuat de pe valț, m;

l – semigrosimea benzii de material, m;

D – diametrul cilindrului, m;

N – turația cilindrului, rot/minut.

Lățimea benzii de material evacuat pe valț depinde de durata procesului de prelucrare, care poate fi exprimat prin:

$$t = \frac{\text{Material pe valt}}{\text{Debit masic}} \quad (3.23)$$

$$t = \frac{\pi DL2l\rho}{120\pi DN B_b \cdot l \cdot \rho} \Rightarrow B_b = \frac{L}{60Nt}$$

și înlocuind în relația (3.22) se obține:

$$M_h = 2\pi l \frac{DL\rho}{t}, \text{ [kg/h]} \quad (3.24)$$

Productivitatea calandrelor se calculează cu formula:

$$M_h = S \cdot V \cdot \rho = B \cdot 2l_f \cdot \pi DN \rho \cdot 60 = 120\pi DN B l_f \rho, \text{ [kg/h]} \quad (3.25)$$

în care:

D – diametrul ultimului cilindru, m;

N – turația cilindrului, rot/minut;

B – lățimea benzii de material evacuat, m;

$l_f$  – semigrosimea benzii de material, m;

$\rho$  – densitatea materialului prelucrat,  $\text{kg/m}^3$ .

Productivitatea medie practică este mai mică și se calculează cu relația:

$$\overline{M_h} = kM_h \quad (3.26)$$

în care  $k$  este un coeficient de utilizare a mașinii și este cuprins între 0,7 și 0,9.

### 3.9. Reglarea regimului termic la valțuri și calandre

În figura 3.11 se dă schema unei instalații de încălzire a unor valțuri care pot să funcționeze prin acționarea grupată sau individuală.

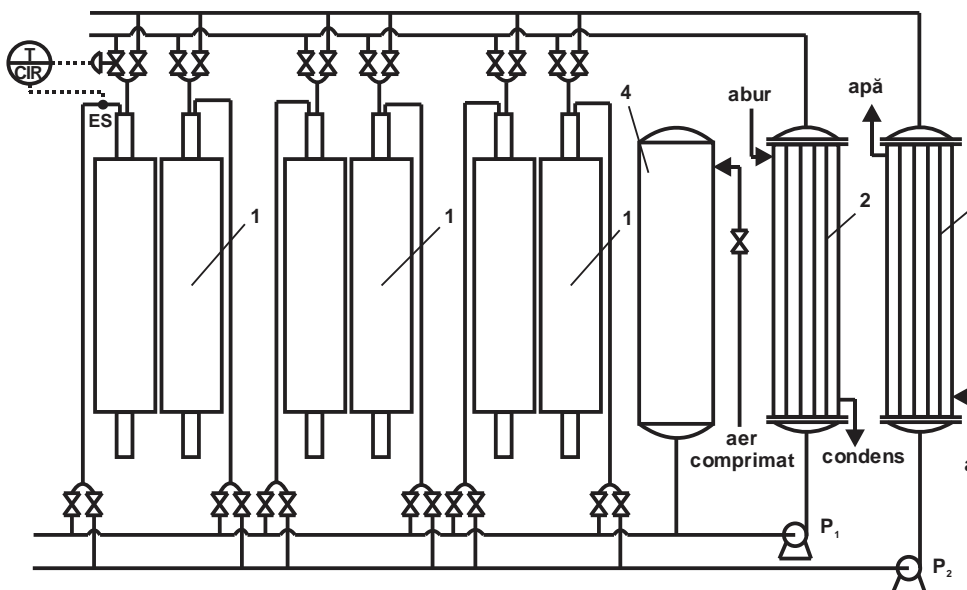


Figura 3.11. Schema de încălzire – răcire a valțurilor.

1 – cilindru, 2 – încălzitor, 3 – răcitor, 4 – rezervor de apă dedurizată,  
P1, P2 – pompe centrifuge, ES – element sensibil.

Deoarece temperatura materialului prelucrat pe valțuri sau calandre nu poate fi măsurată direct în general, aceasta se reglează indirect cu ajutorul temperaturii suprafeței tăbliei sau prin temperatura agentului termic, așa cum se vede din figura 3.11.

În figura 3.12 se prezintă o schemă de reglare a temperaturii prin cilindru de calandru.

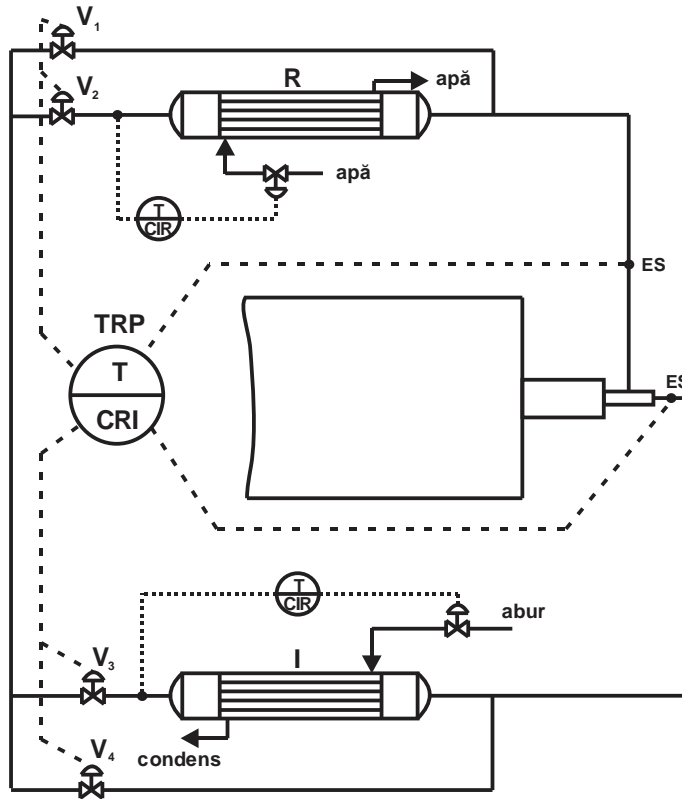


Figura 3.12. Schema de reglare a temperaturii pe calandru

În funcție de temperatura agentului termic sesizată de ES, termo-regulatorul principal TRP comandă ventilelor  $V_1$ - $V_4$  pentru a închide și deschide circuitele de agent termic.

### 3.10. Dispozitive auxiliare

Dispozitivele auxiliare cele mai importante sunt:

- Buncăre
- Hote
- Alimentatoare

- Cilindri auxiliari
- Cuțite
- Dispozitive de tăiere și răsucire
- Limitatoare a părții active
- Etc.

### 3.11. Tehnica securității în muncă la valțuri și calandre

Valțurile și calandrele fiind mașini care au organe de lucru mobile, funcționând în spațiu deschis, se impun o serie de măsuri de protecția muncii cum ar fi:

- închiderea părților mobile în carcase de protecție (axe, roți dințate, etc.);
- dispozitive pentru împiedicarea introducerii mâinii în zona de calandrare;
- limitarea spațiului de lucru cu ajutorul celulelor fotoelectrice;
- introducerea dispozitivelor de comandă sau a barei de comandă.

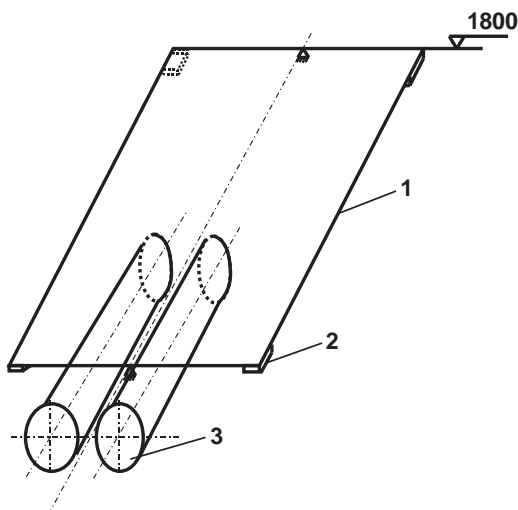


Figura 3.13. Schema de amplasare pentru o bară de comandă  
1 – cadru, 2 – întrerupătoare, 3 – cilindri valț



Acționând bara de comandă se întrerupe circuitul de alimentare a motorului de acționare a cilindrilor și este acționată frâna electromagnetică. Sistemele moderne sunt prevăzute cu reversor de sens de rotație, rotind cilindrii cu 1/3-1/2 rotații în sens invers.

### 3.12. Teoria curgerii materialelor între cilindrii antrenati în sensuri inverse și presați.

#### 3.12.1. Fluide Newtoniene

Această teorie se aplică, printre altele, la prelucrarea materialelor pe mașini cu cilindri, cum sunt valțurile și calandrelle. A fost dezvoltată în principal de Gaskell, iar apoi perfecționată de alți cercetători.

În general, pentru un sistem neizoterm se pot scrie următoarele ecuații de variație:

- a) ecuația de continuitate (conservarea masei)

$$\frac{\Delta l}{\Delta t} = -\rho [\nabla \cdot \vec{V}] \quad (3.27)$$

- b) ecuația de mișcare (conservarea impulsului)

$$\rho \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t} = [\nabla \cdot \tau] - \nabla P + \rho g \quad (3.28)$$

adică legea a doua a lui Newton pentru masa unității de volum sau:

$$\rho a = \sum F_i \quad (3.29)$$

în care  $a$  este accelerația, iar  $\sum F_i$  este suma forțelor care acționează asupra masei unității de volum. Membrul drept al ecuației de mai sus se poate scrie în forma:

$$\sum F_i = \left\{ \begin{array}{l} \text{Forte} \\ \text{vascoase} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Forte de} \\ \text{presiune} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Forte} \\ \text{gravitationale} \end{array} \right\}$$

(3.30)

c) ecuația energiei în termeni de temperatură

$$\rho \hat{C}_v \frac{\Delta T}{\Delta t} = -[\nabla \cdot \vec{q}] - T \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_{\hat{v}} (\nabla \cdot \vec{V}) - [\tau : \nabla \vec{V}] \quad (3.31)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Conductie} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{Compresie} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{Disipare} \\ \text{vascoasa} \end{array} \right\}$$

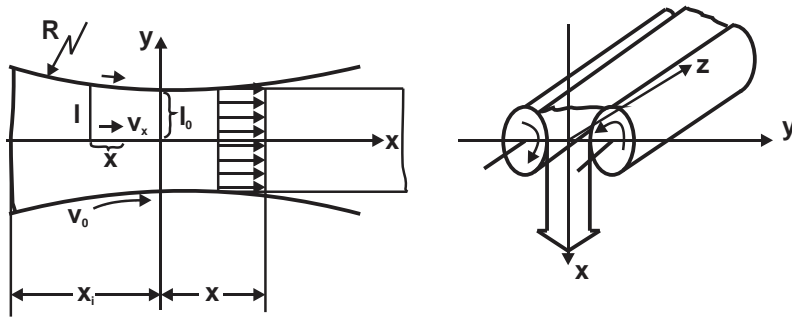


Figura 3.14. Reprezentarea variabilelor în teoria curgerii materialelor între cilindri

Pentru a aplica ecuațiile de mai sus la cazul curgerii materialelor printre cilindrii antrenați și presați se introduc următoarele ipoteze simplificatoare:

- variațiile pe direcția  $z$  se consideră zero;
- regimul este staționar și izoterm;
- fluidul este Newtonian și incompresibil;
- se neglijează forțele gravitaționale.

În aceste condiții ecuația sistemului se simplifică, iar dacă ne interesează numai distribuția vitezei avem:

$$\nabla P = [\nabla \cdot \tau]$$

Deoarece presiunea nu variază pe direcția  $y$  vom avea:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} = \eta \left( \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} \right)$$

iar în final:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \eta \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2}$$

$$\left( \frac{\partial V_x}{\partial x} < \frac{\partial V_x}{\partial y} \text{ și deci cu atât mai mult avem } \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} \ll \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right) \quad (3.33)$$

Integrând ultima ecuație de două ori, avem:

$$V_x = \frac{1}{2\eta} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) y^2 + C_1 y + C_2 \quad (3.34)$$

constantele  $C_1$  și  $C_2$  determinându-se din condițiile la limită:

$$\begin{cases} y = 0, \frac{\partial V_x}{\partial y} = 0 \Rightarrow C_1 = 0 \\ y = l, V_x = V_0 \Rightarrow C_2 = V_0 - \frac{l^2}{2\eta} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \end{cases} \quad (3.35)$$

astfel încât avem soluția:

$$V_x = V_0 + \frac{y^2 - l^2}{2\eta} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (3.36)$$

Debitul volumic pentru unitatea de lungime a cilindrilor este:

$$M_v = 2 \int_0^l V_x dy = 2 \int_0^l \left[ V_0 + \frac{y^2 - l^2}{2\eta} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \right] dy$$

$$M_v = 2 \int_0^l V_0 dy + \frac{1}{\eta} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \int_0^l y^2 dy + \int_0^l -\frac{l^2}{\eta} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) dy$$

$$M_v = 2V_0 l + \frac{1}{3\eta} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) l^3 - \frac{l^3}{\eta} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right)$$

$$M_v = 2l \left[ V_0 - \frac{l^2}{3\eta} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \right] \quad (3.37)$$

Dacă se face transformarea de variabilă:

$$\zeta = \frac{x}{\sqrt{2Rl_0}}, \text{ avem:}$$

$$l = l_0 + R - \sqrt{R^2 - x^2}$$

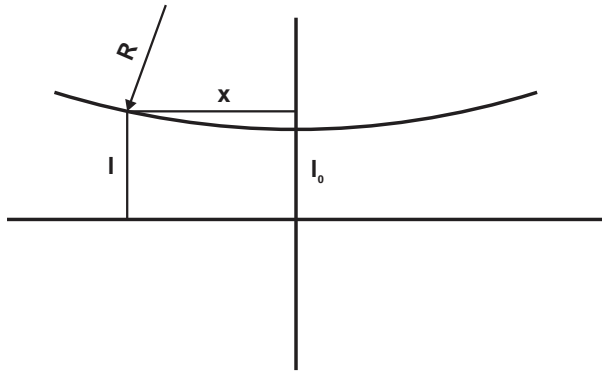


Figura 3.15. Transformarea de variabilă

Dar:

$$\sqrt{R^2 - x^2} = R - \frac{x^2}{2R} \text{ (dezvoltare în serie)}$$

$$l = l_0 + \frac{x^2}{2R} \Rightarrow \frac{l}{l_0} = 1 + \frac{x^2}{2Rl_0} = 1 + \zeta^2 \quad (3.38)$$

Din ecuația debitului se explicitează gradientul de presiune:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{3\eta}{l^2} \left( V_0 - \frac{M_v}{2l} \right)$$

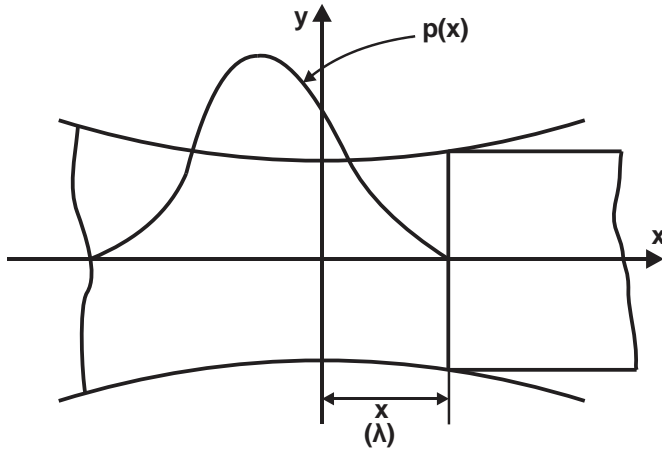


Figura 3.16. Gradientul de presiune

După cum se vede din figura de mai sus, la distanța  $x = X$  (la ieșirea din zona activă) nu avem curgere sub acțiunea gradientului de presiune, care este zero aici. Notăm acest punct  $\xi = \lambda$ , deci:

$$0 = \frac{3\eta}{l^2} \left( V_0 - \frac{M_v}{2l} \right) \Rightarrow M_v = 2V_0 l = 2V_0 l_0 (1 + \lambda^2) \quad (3.39)$$

Integrând ecuația gradientului de presiune, se obține funcția presiunii. Astfel, în coordonate  $\xi$  ecuația devine:

$$\frac{dp}{d\xi} = \sqrt{2Rl_0} \left( \frac{3\eta}{l^2} \right) \left[ V_0 - \frac{M_v}{2l} \right] \quad (3.40)$$

iar cu ajutorul ecuațiilor (3.38) și (3.39) se obține:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{d\xi} &= \sqrt{2Rl_0} \left[ \frac{3\eta}{l_0^2 (1 + \zeta^2)^2} \right] \left[ V_0 - \frac{2V_0 l_0 (1 + \lambda^2)}{2l_0 (1 + \zeta^2)} \right] \\ &\Rightarrow \frac{dp}{d\xi} = \frac{\eta V_0}{l_0} \sqrt{\frac{18R}{l_0}} \left( \frac{\zeta^2 - \lambda^2}{(1 + \zeta^2)^3} \right) \end{aligned} \quad (3.41)$$

Prin integrare se obține:

$$p = \frac{\eta V_0}{l_0} \sqrt{\frac{9R}{32l_0}} [f(\zeta, \lambda) + C] \quad (3.42)$$

cu

$$f(\zeta, \lambda) = \left[ \frac{\zeta^2 - 1 - 5\lambda^2 - 3\lambda^2 \zeta^2}{(1 + \zeta^2)^2} \right] \zeta + (1 - 3\lambda^2) \arctg \zeta \quad (3.43)$$

Constanta  $C$  se determină din condiția:

$$x = X(\zeta = \lambda), p = 0 \Rightarrow$$

$$C = \left( \frac{1 + 3\lambda^2}{1 + \lambda^2} \right) \lambda - (1 - 3\lambda^2) \arctg \alpha \quad (3.44)$$

iar pentru domeniul care ne interesează se poate demonstra că avem:

$$C = 5\lambda^3 \quad (3.45)$$

Să analizăm în continuare curba  $p(\xi)$ . Condiția de extrem a lui  $p$  este:

$$\frac{dp}{d\zeta} = 0 \Rightarrow \zeta = \pm \lambda$$

$$\text{la } \zeta = \lambda \quad p = p_{\min} = 0$$

$$\text{la } \zeta = -\lambda \quad p = p_{\max}$$

Deoarece  $p(\xi, \lambda)$  poate să fie pozitivă sau negativă, funcția  $p(\xi)$  are două rădăcini care interesează:

$$\begin{cases} \zeta = -\zeta_0 \\ \zeta = \lambda \end{cases}$$

Pentru aceste valori tot ecuația presiunii ne arată că trebuie să avem:

$$f(\lambda, \lambda) = -C(\lambda) = -5\lambda^3$$

$$f(-\zeta_0, \lambda) = -C(\lambda) = -5\lambda^3$$

deci:

$$f(\lambda, \lambda) = f(-\zeta_0, \lambda)$$

### 3.12.2. Profilul presiunii

Cu ajutorul funcției  $p(\xi)$  se poate afla presiunea maximă dacă înlocuim  $\xi = -\lambda$ . Funcția  $F(\xi, \lambda)$  fiind impară avem:

$$f(-\lambda, \lambda) = -f(\lambda, \lambda)$$

și dacă ținem cont de ecuațiile de mai sus trebuie să avem (ținând cont de semnificația mărimilor de mai sus):

$$p_{\max} = \frac{5\eta V_0 \lambda^3}{l_0} \sqrt{\frac{9R}{8l_0}} \quad (3.46)$$

iar presiunea adimensională va fi:

$$p_{\text{relativ}} = \frac{p}{p_{\max}} = \frac{p(\zeta)}{p(-\lambda)} = \frac{\frac{\eta V_0}{l_0} \sqrt{\frac{9R}{32l_0}} [f(\zeta, \lambda) + 5\lambda^3]}{5 \frac{\eta V_0}{l_0} \lambda^3 \sqrt{\frac{9R}{8l_0}}} \quad (3.47)$$

În final se obține:

$$\frac{p}{p_{\max}} = \frac{p(\zeta)}{p(-\lambda)} = \frac{\frac{\eta V_0}{l_0} \sqrt{\frac{9R}{32l_0}} [f(\zeta, \lambda) + 5\lambda^3]}{5 \frac{\eta V_0}{l_0} \lambda^3 \sqrt{\frac{9R}{8l_0}}}$$

$$\frac{p}{p_{\max}} = \frac{1}{2} [f(\zeta, \lambda) + 5\lambda^3] = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{f(\zeta, \lambda)}{5\lambda^3} \right] \quad (3.48)$$

Iată câteva valori pentru presiunea relativă:

$$\left\{ \begin{array}{l} \zeta = -\zeta_0, f(-\zeta_0, \lambda) = -5\lambda^3, \frac{p}{p_{\max}} = 0 \\ \zeta = -\lambda, f(-\lambda, \lambda) = 5\lambda^3, \frac{p}{p_{\max}} = 1 \\ \zeta = 0, f(0, \lambda) = 0, \frac{p}{p_{\max}} = \frac{1}{2} \\ \zeta = \lambda, f(\lambda, \lambda) = -5\lambda^3, \frac{p}{p_{\max}} = 0 \end{array} \right.$$

Ecuția presiunii poate fi scrisă în termeni de presiune relativă dacă se pune în forma:

$$p = 10 \left[ \frac{\eta V_0}{l_0} \sqrt{\frac{9R}{32l_0}} \right] \frac{\lambda^3}{2} \left[ 1 + \frac{f(\zeta, \lambda)}{5\lambda^3} \right]$$

$$p = 10 \frac{\eta V_0}{l_0} \sqrt{\frac{9R}{32l_0}} \lambda^3 \left( \frac{p}{p_{\max}} \right)$$

$$p = k\lambda^3 \frac{p}{p_{\max}} = k\lambda^3 p_{rel} \quad (3.49)$$

Se vede că dacă  $\lambda$  crește profilul presiunii se lărgeste, acesta fiind deci un parametru care poate fi determinat experimental.

În figura 3.17 este reprezentată variația presiunii relative pentru un valț cu cilindri de diametru 254 mm. Măsurătorile s-au făcut cu ajutorul unor traductoare de presiune montate în tăblia cilindrului. Rezultatele obținute sunt prezentate în figura de mai jos:



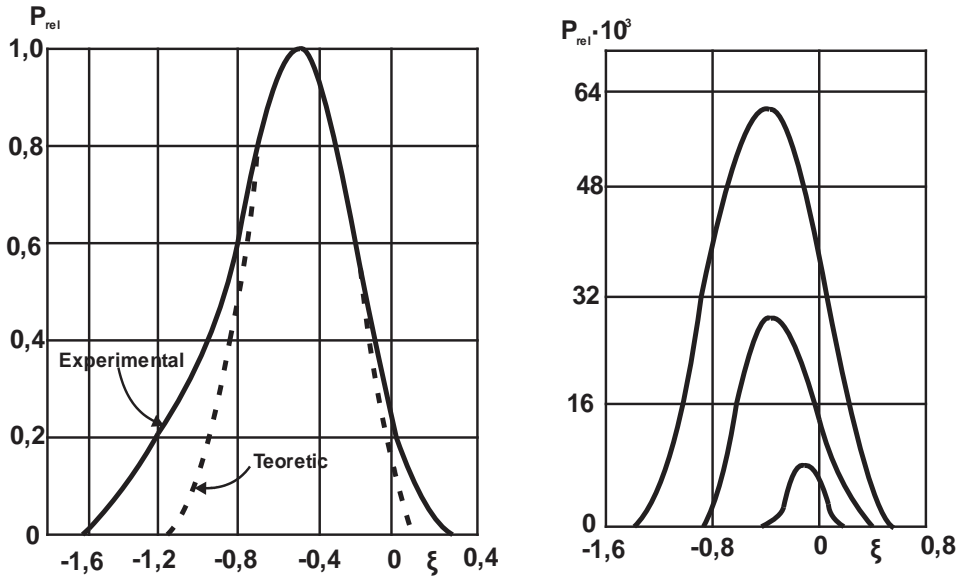


Figura 3.17 Variația presiunii relative pentru un valț

### 3.12.3. Distribuția vitezelor

Viteza fluidului într-o secțiune dată este:

$$V_x = V_0 + \frac{y^2 - l^2}{2\eta} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) = V_0 + \frac{y^2 - l^2}{2\eta} \left( \frac{\partial p}{\partial \zeta} \right) \frac{1}{\sqrt{2Rl_0}}$$

iar cu expresia pentru  $\frac{\partial p}{\partial \zeta}$  se obține:

$$V_x = V_0 + \frac{\frac{y^2}{l^2} - 1}{2\eta} \left( \frac{\eta V_0}{l_0} \right) \sqrt{\frac{18R}{l_0}} \left[ \frac{\zeta^2 - \lambda^2}{(1 + \zeta^2)^3} \right] \frac{1}{\sqrt{2Rl_0}} \quad (3.50)$$

Cu ajutorul unei noi schimbări de variabilă se obține:

$$\zeta_1 = \frac{y}{l} \Rightarrow dy = l d\zeta_1$$

$$V_x = V_0 + \frac{\zeta_1^2 - 1}{2} 3V_0 \frac{\zeta_1^2 - \lambda^2}{1 + \zeta_1^2}$$

sau adimensional:

$$\frac{V_x}{V_0} = 1 + 3 \frac{(\zeta^2 - 1)(\zeta^2 - \lambda^2)}{2(1 + \zeta^2)}$$

$$\frac{V_x}{V_0} = \frac{2 + 3\lambda^2(1 - \zeta_1^2) - \zeta^2(1 - 3\zeta_1^2)}{2(1 + \zeta^2)} \quad (3.51)$$

Deci viteza este o funcție de variabilele adimensionale  $\xi$  și  $\xi_1$  și parametrul  $\lambda$ . Se vede că la  $P_{\max}$  ( $\xi = -\lambda$ ) avem o distribuție tip curgere cu deplasare totală; de asemenea, la desprinderea materialului din zona activă. De fapt aceasta este o curgere prin antrenare, după cum rezultă mai departe:

$$\text{dacă } \zeta = \pm\lambda \Rightarrow \frac{V_x}{V_0} = 1$$

Din figura variației presiunii se vede că în domeniile  $-\lambda < \zeta < \lambda$ ,  $\Delta p < 0$  și deci avem o curgere sub acțiunea gradientului de presiune în sensul rotației cilindrilor, iar profilul vitezelor va fi convex.

Pentru  $\zeta < -\lambda$ ,  $\nabla p > 0$ , iar profilul vitezelor va fi concav (ca și cum materialul ar avea tendința să curgă în sens invers). În acest domeniu, curgerea este întârziată, spre deosebire de primul domeniu, unde am avut curgere accelerată.

Profilul general al vitezelor este ca în figura de mai jos:

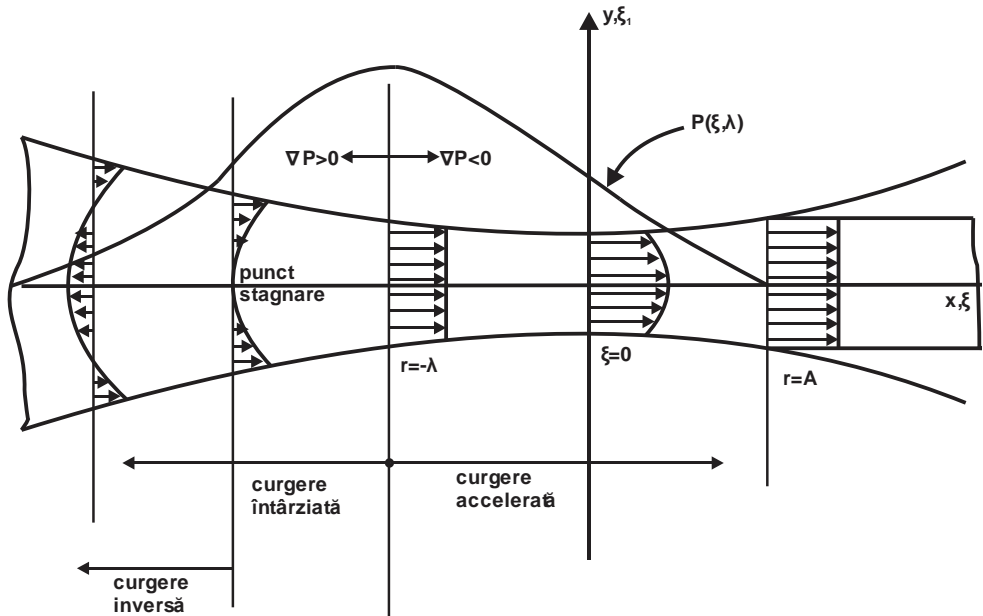


Figura 3.18. Profilul general al vitezelor

După cum se vede din figura de mai sus, pe măsură ce scade  $\xi$  se poate atinge un punct în care viteza este zero sau așa numitul punct de stagnare, a cărui coordonată se află ca mai jos:

$$\begin{cases} \frac{V_x}{V_0} = 0 \\ \zeta_1 = 0 \end{cases} \Rightarrow (\zeta^*)^2 - 3\lambda^2 - 2 = 0$$

Pentru  $\lambda^2 = 0,1 \Rightarrow \zeta^* = -4,8\lambda$ , zona curgerii întârziate și în special domeniul curgerii inverse asigură condiții favorabile pentru procesul de omogenizare a materialului între cilindri.

### 3.13. Puterea necesară pentru antrenarea cilindrilor și forța de depărtare

Viteza de deformare poate fi determinată derivând ecuația vitezei  $v_x$ , cu ajutorul căreia se poate determina puterea de antrenare.

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial V_x}{\partial y} = \frac{1}{l} \left( \frac{\partial V_x}{\partial \zeta_1} \right) = \frac{3V_0 \zeta_1 (\zeta^2 - \lambda^2)}{l(1 + \zeta^2)} = \frac{3V_0 \zeta_1}{l_0} \left[ \frac{\zeta^2 - \lambda^2}{(1 + \zeta^2)^2} \right]$$

La suprafața cilindrului, viteza de deformare va fi:

$$\dot{\gamma}_l = \frac{3V_0}{l_0} \left[ \frac{\zeta^2 - \lambda^2}{(1 + \zeta^2)^2} \right] \quad (3.52)$$

Puterea de antrenare va fi:

$$N = 2F_f V_0 = 2V_0 L \eta \int \dot{\gamma}_l dx = 2V_0 L \eta \sqrt{2Rl_0} \int_{-\zeta_0}^{\lambda} \dot{\gamma} d\zeta$$

După integrarea funcției viteze de deformare se obține:

$$N = 3LV_0^2 \eta \sqrt{\frac{2R}{l_0}} \cdot f(\lambda) \quad (3.53)$$

Forța de depărtare dintre cilindri se obține integrând presiunea pe lungimea zonei de prelucrare, adică:

$$F_d = L \int p dx = L \sqrt{2Rl_0} \int_{-\zeta_0}^{\lambda} p d\zeta = \frac{3\eta V_0 RL}{4l_0} \cdot q(\lambda) \quad (3.54)$$

$$f(\lambda) = (1 - \lambda^2) \left[ t g^{-1} \lambda + t g^{-1} \zeta_0 \right] - \left[ \frac{(1 - \zeta_0)(1 + \zeta_0 \lambda)}{(1 + \zeta_0)^2} \right] \quad (3.55)$$

$$q(\lambda) = \frac{(1 + \zeta_0)}{(1 + \zeta_0^2)} \left[ \zeta_0 - \lambda + 5\lambda^3 (1 + \zeta_0^2) \right] + (1 - 3\lambda^2) \left[ \lambda t g^{-1} \lambda - \zeta_0 t g^{-1} \zeta_0 \right] \quad (3.56)$$

Cele două funcții de mai sus pot fi estimate și din figura următoare.

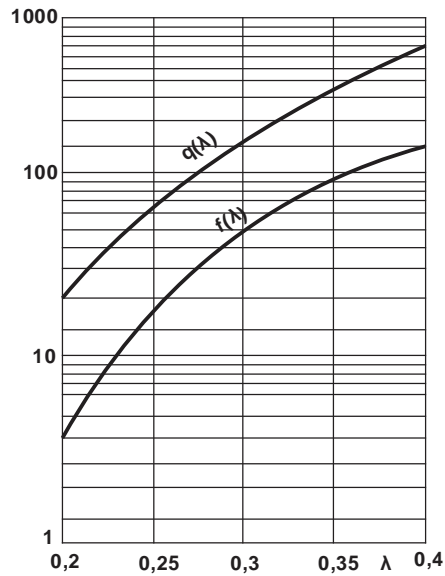


Figura 3.19. Reprezentarea grafică a funcției forței de depărtare

### 3.14. Curgerea fluidelor ne-Newtoniene

Considerând valabile simplificările introduse la curgerea fluidelor Newtoniene și făcând transformările de variabile:

$$\xi = \frac{x}{\sqrt{2Rl_0}}; \xi_1 = \frac{y}{\sqrt{2Rl_0}}$$

ecuația de mișcare devine:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{d\tau_{yx}}{dy} \text{ sau } \frac{dp}{d\xi} = \frac{d\tau}{d\xi_1}$$

Notând  $\frac{dp}{d\xi} = \bar{p}$  se obține final:

$$dc = \bar{p}d\xi_1 \Rightarrow c = \bar{p}\xi_1$$

Considerând valabilă legea puterii avem:

$$\tau_{yx} = k \dot{\gamma}_{yx}^n = k \left( \frac{dV_x}{dy} \right)^n = k \frac{1}{\left( \sqrt{2Rl_0} \right)^{\frac{1}{\varepsilon}}} \cdot \left( \frac{dV_x}{d\xi_1} \right)^{\frac{1}{\varepsilon}}$$

Deci:

$$\bar{p}\xi_1 = \frac{k}{\left( \sqrt{2Rl_0} \right)^{\frac{1}{\varepsilon}}} \left( \frac{dV_x}{d\xi_1} \right)^{\frac{1}{\varepsilon}}, \text{ sau } \frac{dV_x}{d\xi_1} = \left( \frac{\bar{p}}{k} \right)^{\varepsilon} \sqrt{2Rl_0} \xi_1^{\varepsilon} \quad (3.58)$$

Prin integrare se obține:

$$V_x = \left( \frac{\bar{p}}{k} \right)^{\varepsilon} \frac{\sqrt{2Rl_0}}{\varepsilon + 1} \xi_1^{\varepsilon+1} + C \quad (3.59)$$

Constanta  $C$  se determină din condiția la limită:

$$\xi_1 = \frac{l}{\sqrt{2Rl_0}}, V_x = V_0 \Rightarrow C = V_0 - \left( \frac{\bar{p}}{k} \right)^{\varepsilon} \frac{\sqrt{2Rl_0}}{\varepsilon + 1} \cdot \frac{\left[ l_0 (1 + \xi^2) \right]^{\varepsilon+1}}{\left( \sqrt{2Rl_0} \right)^{\varepsilon+1}}$$

$$V_x = V_0 - \left( \frac{\bar{p}}{k} \right)^{\varepsilon} \left[ \frac{l_0^{\varepsilon+1} (1 + \xi^2)^{\varepsilon+1}}{(\varepsilon + 1) \left( \sqrt{2Rl_0} \right)^{\varepsilon}} - \frac{\sqrt{2Rl_0}}{\varepsilon + 1} \cdot \xi_1^{\varepsilon+1} \right] \quad (3.60)$$

Debitul pe unitatea de lungime de cilindru este:

$$M_V = 2 \int_0^l V_x dy = 2 \sqrt{2Rl_0} \int_0^{\xi_1} V_x d\xi_1$$

Înlocuind expresia vitezei și după integrare se obține:

$$M_V = 2l_0 (1 + \xi^2) \left[ V_0 - \left( \frac{\bar{p}}{k} \right)^{\varepsilon} \frac{1}{\left( \sqrt{2Rl_0} \right)^{\varepsilon}} \cdot \frac{l_0^{\varepsilon+1} (1 + \xi^2)^{\varepsilon+1}}{\varepsilon + 2} \right] \quad (3.61)$$

La ieșirea din zona de lucru a cilindrilor, unde  $\bar{p} = 0$ , avem:

$$M_V = 2V_0 l_0 (1 + \lambda^2)$$

Pe baza condiției de continuitate se pot egala ultimele două ecuații și se obține:

$$\frac{dp}{d\xi} = 2(2 + \varepsilon)^{\frac{1}{\varepsilon}} \frac{k \left( \frac{V_0}{l_0} \right)^{\frac{1}{\varepsilon}} (\xi^2 - \lambda^2)^{\frac{1}{\varepsilon}}}{\sqrt{\frac{2l_0}{R}} (1 + \xi^2)^{1 + \frac{2}{\varepsilon}}} \quad (3.62)$$

Se vede că pentru  $\varepsilon=1$ , adică pentru fluide Newtoniene avem:

$$\frac{dp}{d\xi} = \frac{\eta V_0}{l_0} \sqrt{\frac{18R}{l_0}} \left[ \frac{\xi^2 - \lambda^2}{(1 + \xi^2)^3} \right] \quad (3.63)$$

Condiția de extrem a presiunii conduce la:

$$p_{\max} = p(-\lambda)$$

Folosind teorema mediei din analiza matematică se poate integra ecuația gradientului de presiune și se obține:

$$p_{\max} = 2\lambda C (-\lambda^2)^{\frac{1}{\varepsilon}} \quad (3.64)$$

unde:

$$C = 2(2 + \varepsilon)^{\frac{1}{\varepsilon}} \frac{k \left( \frac{V_0}{l_0} \right)^{\frac{1}{\varepsilon}}}{\sqrt{\frac{2l_0}{R}}} \quad (3.65)$$

Similar cu cazul fluidelor Newtoniene vom avea variația presiunii. Forța de depărtare a cilindrilor se calculează similar ca la fluide Newtoniene, integrarea presiunii aproximându-se cu aria triunghiului ABC.

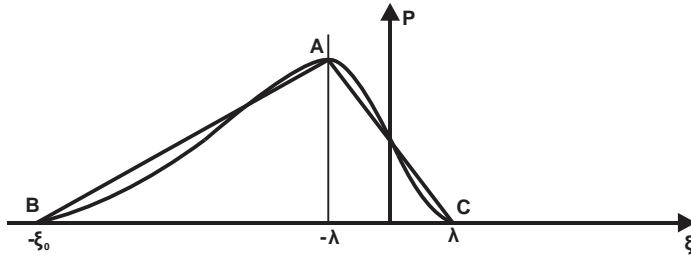


Figura 3.20. Variația presiunii în cazul curgerii fluidelor ne-newtoniene

$$F_d = \int_{-\xi_0}^{\lambda} p(\xi) d\xi = \frac{1}{2} \sqrt{2Rl_0} (\xi_0 + \lambda) p_{\max} \quad (3.66)$$

Puterea necesară pentru acționarea cilindrilor se calculează cu ajutorul momentului, care pentru unitatea de lungime a cilindrilor este:

$$dM^* = F_r \tau_p dA$$

unde  $\tau_p$  este tensiunea la peretele cilindrului. Pentru unghiuri mici de înfășurare a materialului pe cilindri se poate scrie:

$$dA = dx = \sqrt{2Rl_0} d\xi$$

$$\tau_p = \bar{p} \frac{\xi}{l} = \bar{p} \frac{l}{\sqrt{2Rl_0}} = C \frac{(\xi^2 - \lambda^2)^{\frac{1}{\varepsilon}}}{(1 + \xi^2)^{1 + \frac{2}{\varepsilon}}} l_0 (1 + \xi^2) \frac{1}{\sqrt{2Rl_0}}$$

$$\tau_p = Cl_0 \frac{(\xi^2 - \lambda^2)^{\frac{1}{\varepsilon}}}{(1 + \xi^2)^{\frac{2}{\varepsilon}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2Rl_0}}$$

$$M^* = RCl_0 \int_{-\xi_0}^{\lambda} \frac{(\xi^2 - \lambda^2)^{\frac{1}{\varepsilon}}}{(1 + \xi^2)^{\frac{2}{\varepsilon}}} d\xi = RCl_0 I \quad (3.67)$$

Pentru valori ale lui  $\lambda = 0,5$  și  $\xi_0 = 4,5$ , valoarea integralei este redată în tabelul următor:



$\varepsilon$	1	2	3	4
I	0,338	0,981	1,45	1,70

## Capitolul IV. PRESE

In continuare se vor trata câteva probleme la presele hidraulice, larg utilizate în prelucrarea polimerilor, cum ar fi pentru:

- presarea materialelor termorigide;
- presarea cauciucului nevulcanizat;
- presarea foilor de materiale plastice.

Operația de presare se poate realiza în matrițe, cum este cazul presării profilurilor termorigide sau fără matriță – ca în cazul presării foilor sau a foliilor. De asemenea, presarea se poate face la cald sau la rece. Parametrii operației de presare depind de natura polimerului și a produsului obținut în general.

### 4.1. Clasificarea preselor

Clasificarea preselor se poate face funcție de mai multe criterii, din care se vor reține:

- a) După direcția de acțiune a cilindrului sau a cilindrilor de lucru:
  - cu presare de sus;
  - cu presare de jos;
  - cu presare de sus și jos;
  - prese speciale (cu platouri în unghi).
- b) După modul de deplasare a platoului mobil:
  - prese cu coloane;
  - prese cu cadru.
- c) După numărul cilindrilor de lucru:
  - cu 1 cilindru de lucru;
  - cu 2 sau mai mulți cilindri de lucru.
- d) După numărul etajelor:

- prese cu un etaj sau un platan;
- prese multietajate sau cu mai multe platane.

În figura 4.1 se dă schema de construcție a două tipuri de prese, anume presa cu coloane și o presă cu cadru.

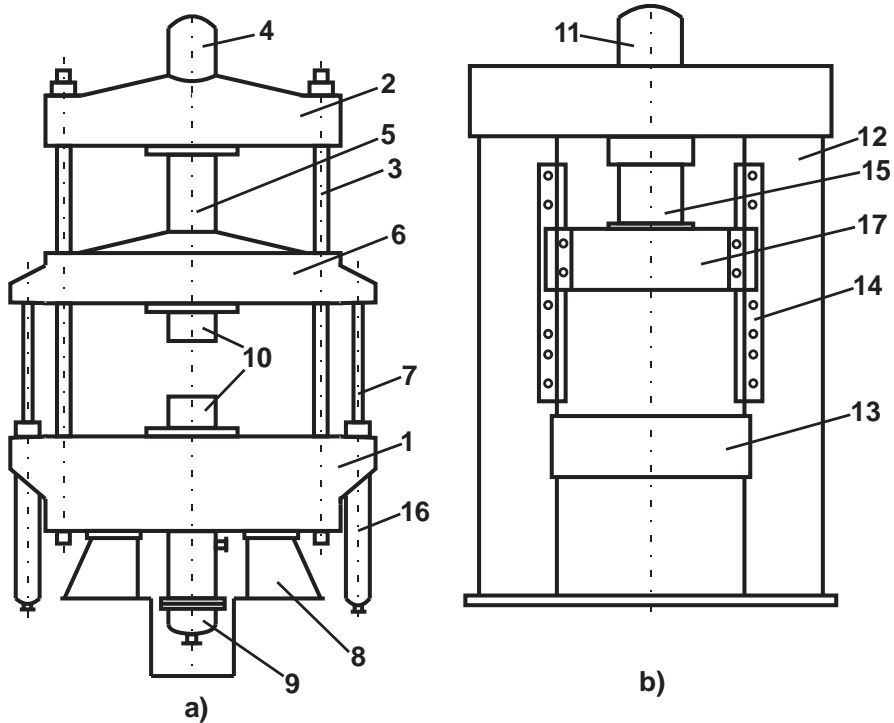


Figura 4.1. Presa cu coloane (a) și cu cadru (b)

Presă cu coloane este formată din masa presei (1), platoul sau traversa superioară fixă (2) și un număr de 4 coloane (3) (în general). Aceste elemente asigură structura rigidă a presei.

Pe traversa superioară (2) se montează unul sau mai mulți cilindri de lucru (5) care este prins la un capăt de platoul mobil (6). Elementele matriței (10) sunt fixate, jumătate pe platoul mobil și jumătate pe masa presei. Întreaga presă este susținută de suportii (8), iar pentru scoaterea produsului

presa poate fi prevăzută și cu un cilindru de scoatere (9). Pentru ridicarea platoului mobil (6) sunt prevăzuți cilindrii de întoarcere (16) în care se deplasează pistoanele de întoarcere (7).

Presa cu cadru este formată dintr-un cadru (12), masa fixă sau masa presei (13), un cilindru de lucru (11) cu pistonul de lucru (15) și plăcile de glisare (14) pe care se deplasează platoul mobil (17).

## **4.2. Construcția elementelor presei**

### **4.2.1. Cilindrul de lucru**

Cilindrul de lucru se execută din oțel forjat sau din oțel turnat tratat, tratat termic. Diametrul interior al cilindrului se calculează din forța nominală a presei  $F_n$

$$F_n = \frac{\pi}{4} d_p^2 \cdot p \quad (4.1)$$

în care  $d_p$  este diametrul pistonului de lucru, iar  $p$  este presiunea de lucru în sistemul hidraulic. În final, diametrul interior se calculează din:

$$D_i = k \cdot d_p \quad (4.2)$$

în care  $k$  este un coeficient de joc. La cilindrii turnați, jocul radial se consideră 25-35 mm, iar la cei forjați 10-15 mm. În general, se poate considera  $k = 1,03-1,11$ . La pistoanele diferențiale  $k = 1$ .

Diametrul ștuțului de intrare se calculează pentru o viteză a fluidului de lucru de maxim 10 m/s.

### **4.2.2. Pistonul de lucru**

Pistonul de lucru se execută din oțel forjat sau turnat. De asemenea, el poate fi executat din fontă cenușie de bună calitate. Pistonul de lucru

trebuie să fie foarte bine prelucrat astfel încât să nu producă o uzură prea mare a sistemului de etanșare.

### 4.2.3. Coloanele

Coloanele sunt de formă cilindrică și asigură sistemul rigid împreună cu masa preseii și traversa superioară. Pe de altă parte, coloanele asigură ghidarea platoului mobil în operația de presare și retragere.

Coloanele se execută din OL C 35, 35 CN 15 sau 35 CN 25. Se tratează termic și se prelucrează.

Coloanele trebuie să fie perfect cilindrice, paralele între ele și perpendiculare pe masa preseii și traversa superioară.

### 4.2.4. Masa și traversa presei cu coloane

Masa și traversa presei cu coloane sunt supuse la încovoiere datorită forței de presare, de aceea se execută din fontă cenușie de bună calitate (minim Fe 24).

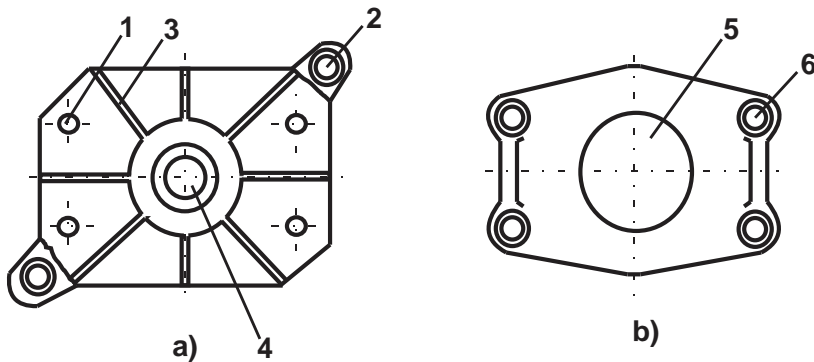


Figura 4.2. Masa (a) și traversa (b) preseii

Atât masa presei, cât și traversa (figura 4.2) se construiesc în formă de cheson pentru a obține un modul de rezistență mare. Masa presei este prevăzută cu locașuri pentru coloane (1), cilindri de întoarcere (2) și pentru cilindrul și pistonul de scoatere (4). De asemenea, pentru fixarea semimatriței fixe, masa presei este prevăzută cu șanțuri în  $T$ . Traversa se construiește similar cu masa presei și este prevăzută cu locașuri pentru prinderea coloanelor (6) și pentru fixarea cilindrului de lucru (5).

#### **4.2.5. Platoul mobil**

Platoul mobil se execută în sistem nervurat cu suprafața pe care se montează semimatrița mobilă prevăzută cu șanțuri în  $T$ . Se construiește de regulă din fontă cenușie (minim Fe 24).

#### **4.2.6. Cadru presei cu cadru**

Acest cadru se construiește din fontă sau laminate din oțel îmbinate prin sudură (la presele mari).

### **4.3. Acționarea și comanda presei**

Acționarea și comanda presei poate fi făcută:

- a) în grup;
- b) individual.

Acționarea în grup se face de la o stație centrală de pompe și acumulate, iar acționarea individuală de la un grup propriu de pompe pentru fiecare presă.

Drept fluid de lucru se poate utiliza uleiul sau emulsia de ulei în apă. Din considerente economice, o parte din operații se execută cu fluid de presiune joasă și numai presarea se face cu fluid de înaltă presiune.

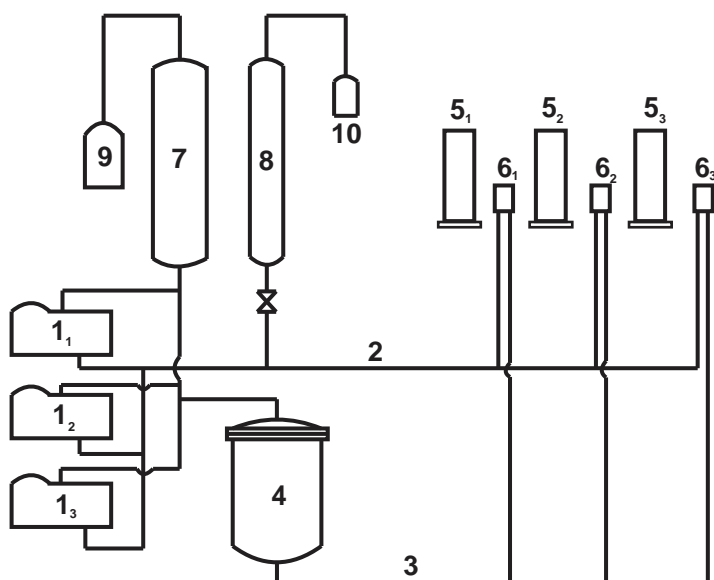


Figura 4.3. Schema de principiu a unei stații de pompe cu acumuloare pneumatice

Stația de pompe din figura 4.3 este formată din trei pompe de înaltă presiune (1) care refulează fluidul de lucru în magistrala de presiune înaltă (2), de unde se distribuie cu ajutorul distribuitorilor hidraulice (6) la presele (5). Fluidul de lucru se întoarce la pompe prin magistrala de joasă presiune (3) pe care se montează un filtru (4) pentru a proteja suprafețele și etanșările.

Datorită funcționării preselor în ciclu, pe cele două magistrale se montează două acumuloare, unul de joasă presiune (7) și altul de înaltă presiune (8), care preiau variațiile de debit și presiune din sistem. Volumul

fluidului de lucru din acumulator este 0,5 din volumul acestora. Deasupra nivelului fluidului de lucru din acumulator se creează o pernă de gaz cu ajutorul compresoarelor (de înaltă și de joasă presiune) (9) și (10). Drept gaz de lucru se utilizează aerul (dacă lichidul de lucru este ulei în apă) sau azotul (dacă se lucrează cu ulei mineral), pentru a preveni incendiile și exploziile din acumulator datorită ridicării temperaturii prin comprimarea gazului ca rezultat al creșterii volumului de fluid în urma descărcării preselor spre exemplu.

Pentru un grup de prese care lucrează asemănător, se calculează debitul de lichid de înaltă presiune cu formula:

$$M_v = 1,25(M_{v1} + M_{v2} + M_{v3}) \quad (4.3)$$

în care:

$M_{v1}$  – debitul necesar închiderii și deschiderii matriței;

$M_{v2}$  – debitul necesar acționării pistonului de scoatere;

$M_{v3}$  – debitul necesar închiderii și deschiderii matriței la operațiile intermediare de presare.

$$\begin{aligned} M_{v1} &= \frac{\pi d_p^2 H \cdot n_p \cdot K \cdot k}{4 \cdot t} \\ M_{v2} &= \frac{\pi d_s^2 h \cdot n_p \cdot K \cdot m}{4 \cdot t} \\ M_{v3} &= \frac{\pi d_p^2 \cdot h_1 \cdot n_p \cdot n_i \cdot K \cdot g}{4 \cdot t} \end{aligned} \quad (4.4)$$

în care:

$d_p, d_i$  – diametrul pistonului de lucru sau de întoarcere;

$d_s$  – diametrul pistonului de scoatere;

$H$  – lungimea cursei sub presiune înaltă;

$n_p$  – numărul preselor;

$K$  – coeficient de utilizare a timpului;

$k$  – numărul pistoanelor la o presă;



$t$  – durata medie a unui ciclu de presare;

$h$  – lungimea cursei pistonului de scoatere;

$h_1$  – lungimea media a cursei la presarea intermediară.

$n_i$  – numărul mediu de presări intermediare;

$m$  – fracția de prese prevăzute cu cilindru de scoatere;

$g$  – partea de prese care efectuează presări intermediare.

Acționarea individuală a preselor se realizează cu pompe acționate electric. Se utilizează o pompă de joasă și una de înaltă presiune (cu roți dințate și cu pistoane).

## **Capitolul V. ELEMENTE DE INGINERIA PROCESULUI DE FILARE SI MASINI DE FILAT**

### **Mașini de filat**

În acest capitol se va face o modestă introducere în procesele și utilajele cu ajutorul cărora se obțin fibrele și firele.

Procesele de prelucrare a polimerilor în vederea obținerii fibrelor sunt procese dintre cele mai complexe. Motiv pentru care, se pare, problemele teoretice au rămas în urma soluțiilor practice găsite pentru realizarea acestora. Chiar această complexitate deosebită a proceselor de filare impune o tratare deosebită a acestora, astfel încât acest capitol va fi redactat într-o manieră deosebită de a celorlalte capitole. Astfel, după o foarte succintă clasificare, se va analiza componența unei mașini de filat, după care, se vor trata considerațiile teoretice, mai ales privind solidificarea polimerilor din topitură sau soluție. Apoi se va analiza problema modelării proceselor de formare din topitură și din soluție, iar în final vor fi prezentate unele probleme de construcție și funcționare a unor părți din mașina de filat.

#### **5.1. Clasificarea mașinilor de filat**

Din multitudinea de criterii pentru clasificare mașinilor de filat vom reține în continuare numai pe cele direct legate de modul de abordare din acest capitol. Astfel, după starea în care se găsește polimerul înainte de filare avem:

- a) mașini de filat din topitură;
- b) mașini de filat din soluție.

Aceasta din urmă poate să funcționeze în mai multe moduri, după cum se realizează formarea: - mașini pentru filarea umedă, dacă formarea se

realizează dintr-o soluție de polimer care precipită sau coagulează într-o baie care conține, printre altele, un nesolvent sau un agent de precipitare, cu sau fără reacție chimică.

Atât în cazul filării din topitură, cât și la filarea din soluție există o mare varietate de soluții tehnice. Astfel, filarea din topitură se poate realiza cu mașini de filat cu grilă de topire sau cu extruder, după cum transformarea polimerului solid în topitură se realizează pe un dispozitiv de topire și extruderea ulterioară a topiturii sau încălzirea, plastifierea, topirea și extruderea se realizează pe un extruder, iar dozarea cu pompe suplimentare și în final extruderea prin filieră.

## 5.2. Componenta unei mașini de filat

În toate cele ce urmează vom considera mașina de filat ca fiind formată din 5 părți componente cărora le pot fi atașate 5 sisteme, anume:

- 1) Sistemul de alimentare, distribuție și dozare;
- 2) Sistemul de filare;
- 3) Sistemul de formare;
- 4) Sistemul de etirare;
- 5) Sistemul de recepție.

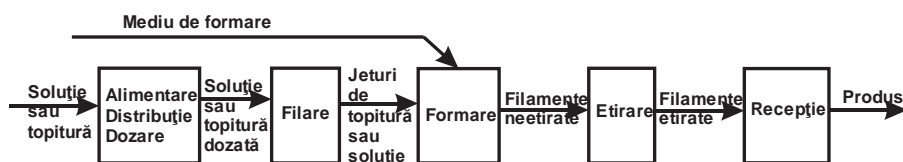


Figura 5.1. Componenta unei mașini de filat

După cum se vede din figura de mai sus, din componența unei mașini de filat se exclud instalațiile care pregătesc polimerul (topire,

dizolvare, etc.) în vederea alimentării acestuia pe mașină, deci acestea pot face parte din mașina de filat ca ansamblu de părți fizic constituite. Cu alte cuvinte, se consideră că topirea sau dizolvarea polimerului nu sunt procese specifice în industria de fabricare a fibrelor în general sau în filare, în special.

Mai trebuie precizat, de asemenea, că nu toate sistemele de mai sus se constituie sub forma unui ansamblu unitar. Spre exemplu, pentru anumite produse, procesul de etirare se poate realiza pe o mașină separată, destinată special acestui scop.

### 5.3. Principiile solidificării

Solidificarea sau transformarea fluidului de filat în polimer solid este unul din elementele cele mai importante ale proceselor de formare a fibrelor. Aceasta înseamnă transformări ireversibile ale unor proprietăți structurale și macroscopice ale materialului, așa cum sunt orientarea macromoleculară, cristalinitatea, pe de o parte, și vâscozitatea, proprietățile fizico-mecanice, pe de altă parte.

Oricare din caracteristicile macroscopice ale materialului  $u_k$  este o funcție de diferiți parametri  $\Phi_j$  ( $j=1,2,\dots,N$ ).

Viteza de variație a acestor caracteristici, care poate fi privită ca o măsură parțială a vitezei de solidificare, poate fi reprezentată prin ecuația:

$$\frac{du_k}{dt} = \sum_{j=1}^N \left( \frac{\partial u_k}{\partial \Phi_j} \right) \frac{d\Phi_j}{dt} \quad (5.1)$$

Variabilele  $\Phi_j$  includ parametrii de stare termodinamici obișnuți (temperatura, compoziția, etc.) ca și valorile instantanee, tranzitorii, ale caracteristicilor structurale (gradul de cristalinitate, orientarea macromoleculară, gradul de agregare moleculară, densitatea legăturilor intermoleculare, etc.).

Variabilele dinamice, cinematice și structurale care determină toate caracteristicile macroscopice ale sistemului (și deci cursul procesului de formare a fibrelor) într-un mod univoc sunt:

- vectorul viteză  $\vec{v}(x, y, z)$
- tensorul tensiunii  $\tau(x, y, z)$
- N variabile de stare  $\Phi_j(x, y, z)$

toate fiind deci funcție de poziția din spațiul de filare.

Determinarea acestor variabile poate fi făcută prin două metode.

Prima, abordarea macroscopică, constă în următoarele ecuații:

1) Ecuația de continuitate pentru un component

$$\frac{\Delta \rho_i}{\Delta t} + \rho_i \cdot \text{div } \vec{v} = 0 \quad (5.2)$$

2) Ecuația de mișcare

$$\rho \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = [\nabla \cdot \tau] - \nabla P + \rho g \quad (5.3)$$

3) Ecuația energiei

$$\rho C_u \frac{\Delta T}{\Delta t} = -[\nabla \cdot q] + [\tau : \nabla \vec{v}] - \frac{\Delta u}{\Delta t} \quad (5.4)$$

4) Ecuația constitutivă

$$F(\tau, \vec{v}, u_1, u_2, \dots, u_k, t) = 0 \quad (5.5)$$

5) Relația dintre caracteristicile reologice, variabilele de stare  $\Phi_j$ , tensorul tensiunii și viteza

$$u_k = \Phi_k(\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \dots, \tau, \vec{v}) \quad (5.6)$$

6) Ecuațiile cinetice pentru procesele individuale, elementare

$$\frac{\Delta \Phi_j}{\Delta t} = Y_j[\Phi_1, \Phi_2, \dots, \tau, \vec{v}] \quad (5.7)$$

Primele trei ecuații sunt conservarea masei, impulsului și a energiei (calorice).

Cu toată complicația aparentă, ecuațiile de mai sus reprezintă o formulare foarte simplificată.

Din punct de vedere a termodinamicii mediilor continui, problema ar trebui tratată ca o soluție a unui sistem de ecuații funcționale, care să descrie tensorul tensiunii, fluxul de căldură, energia liberă, energia internă și entropia ca funcționale pe întreg domeniul de deformare și temperatură.

Formalismul exact nu conduce totuși la informații direct utile în practică. Chiar și formalismul simplificat este departe de acest scop și impune multe simplificări și aproximări.

O formulare alternativă a cineticii solidificării se poate baza numai pe caracteristicile structurale. Dacă în ecuația constitutivă, tensorul tensiunii  $\tau$  este exprimat direct prin variabilele termodinamice și structurale  $\Phi_j$ , problema se reduce la ecuațiile de variație sau conservare și o ecuație constitutivă în forma:

$$\tau = F(\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_N) \quad (5.8)$$

Studiile teoretice fiind la început, după cum am mai spus mai sus, singura cale pentru studiul solidificării sunt ecuațiile (5.1) – (5.7).

În filarea din topitură, viteza de solidificare este controlată în primul rând de transferul de căldură spre mediul înconjurător (răcirea liniei de filare). În cazul filării uscate din sisteme binare, atât transferul de căldură cât și cel de masă controlează procesul.

O situație complexă apare în filarea umedă, unde difuzia multicomponentă este însoțită de tranzițiile de fază și structurale (precipitarea polimerului, cristalizarea, gelifierea) și, în unele cazuri, de reacții chimice.

Alte procedee implică:

- cristalizarea multicomponentă (filarea prin separarea de fază);

- coalescența picăturilor de emulsie (filarea din emulsie);
- reacții de polimerizare (filarea prin policondensare interfacială) etc.

### 5.3.1. Transferul de căldură

Transferul de căldură între filament și mediul de formare se poate realiza după diferite mecanisme. În filament conductivitatea este determinantă, în particular dacă filamentul este solid sau fluid vâcos. Transferul de la suprafață la mediu se realizează prin convecție, radiație și evaporarea solventului în cazul filării uscate. Ecuația cinetică a distribuției temperaturii se poate obține din ecuația energiei. Se poate presupune că variația energiei interne  $u$ , energia disipată datorită curgerii ( $\nabla : \nabla \vec{v}$ ) pot fi neglijate și că fluxul de căldură este determinat numai de convecție. Rezultă deci ecuația:

$$\rho C_u \frac{\Delta T}{\Delta t} = -[\nabla \cdot q] = -[\nabla \cdot \lambda \nabla T] \quad (5.9)$$

Dacă  $\rho$ ,  $\omega$  și  $\lambda$  sunt constante, iar derivata substanțială sau materială este determinată numai de variația în spațiu (proces staționar):

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\partial T}{\partial t} + [\vec{v} \cdot \nabla T] \approx v_x \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (5.10)$$

se obține ecuația conducției în coordonate cilindrice:

$$\frac{\partial T(x, r)}{\partial x} = \left( \frac{\lambda}{\rho C_p V} \right) \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial}{\partial r} \right) \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (5.11)$$

cu condițiile la limită:

$$- \text{temperatura de extrudare uniformă: } T(0, r) = T_0 \quad (5.12)$$

$$- \text{condiție de simetrie: } \left. \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right|_{r=0} = 0 \quad (5.13)$$

$$\left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) \Big|_{r=R(x)} = -[T(x, R) - T_\infty] \alpha^* / \lambda \quad (5.14)$$

în care  $\alpha^*$  este coeficientul de transfer de căldură de la suprafață, iar  $T_\infty$  este temperatura mediului de formare.

Neglijând transferul de căldură în lungul filamentului ne conduce la expresia:

$$\frac{\partial T}{\partial \alpha} = \frac{a}{V} \cdot \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (5.15)$$

în care  $a$  este difuzivitatea.

Deoarece variabilele  $V$ ,  $R$  și  $\alpha^*$  sunt funcție de  $x$ , nu se pot separa și deci nu se poate obține o soluție analitică exactă a ecuației de mai sus. Dacă, totuși, am considera parametrii constanți am avea soluția:

$$\frac{T(x, r) - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_k} \cdot \frac{I_1(\mu_k) I_0(\mu_k r / R)}{I_0^2(\mu_k) + I_1^2(\mu_k)} \exp(-\mu_k^2 \lambda x) / (\rho C_p V R^2) \quad (5.16)$$

unde  $I_0$  și  $I_1$  sunt funcții Bessel de primă speță, de ordinul zero și 1, iar valorile proprii sunt determinate de:

$$\mu_k I_1(\mu_k) = (\alpha^* R / \lambda) I_0(\mu_k) \quad (5.17)$$

S-au făcut multe încercări de a aplica această soluție la filare, unde  $V$ ,  $R$  și  $\alpha^*$  sunt funcții de coordonata axială  $x$ .

Ziabicky ia valori medii, iar Anderson și Pechoc iau valori finale  $V_L$ ,  $R_L$  și  $\alpha_L^*$ , adică la înfășurarea ( $x=L$ ).

Pe de altă parte, Anderson a mai făcut unele simplificări suplimentare și a obținut soluția:

$$\frac{T(x, r) - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_k} \cdot \frac{I_1(\mu_k) I_0\left(\mu_k \cdot \frac{r}{R}\right)}{I_0^2(\mu_k) + I_1^2(\mu_k)} \cdot \exp\left[-\int_0^x (\mu_k^2 \lambda / \varphi C_p V R^2) d\xi\right] \quad (5.18)$$



Dacă parametrii sunt constanți, se obține ecuația de mai sus, simplificată.

Să considerăm două cazuri:

a)  $B_i = (\alpha^* R / \lambda) \ll 1$ , adică filamente fine la  $\alpha^*$  mic,  $\lambda$  mare. În acest caz, distribuția radială poate fi neglijată și se poate întocmi bilanțul:

$$2\pi R\alpha^* (\bar{T} - T_\infty) dxdt + \pi R^2 \left[ \varphi (C_p d\bar{T} - K_c d\theta_c - K_s dC_s) - \tau_{xx} q^* dt \right] dx = 0 \quad (5.19)$$

Primul termen descrie pierderile de căldură de la suprafața filamentului, cu coeficientul  $\alpha^*$ , al doilea corespunde modificării temperaturii filamentului, iar următorii doi termeni sunt efectele termice ale cristalizării polimerului și evaporării solventului, unde  $\theta_c$  este gradul de cristalinitate și  $c_s$  concentrația solventului în filament,  $K_c$  și  $K_s$  sunt căldurile latente de cristalizare și vaporizare. Ultimul termen descrie generarea căldurii în curgerea vâscoasă elongațională cu gradientul de viteză  $q^*$  și tensiunea la tracțiune  $\tau_{xx}$ .

Integrând ecuația de mai sus cu condițiile  $T_{(x=0)}=T_0$  se obține:

$$\frac{\bar{T}(x) - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = (1 + K) \exp \left\{ - \int_0^x \left[ 2\alpha^* (\xi) / \rho C_p R(\xi) V(\xi) \right] d\xi \right\} = \quad (5.20)$$

$$= (1 + K) \exp \left[ -A(x) \right]$$

unde:

$$K(x) = (T_0 - T_\infty)^{-1} \int_0^x (C_p V)^{-1} \exp(A) \left[ K_c \left( \frac{d\theta_c}{dt} \right) + K_s^* \left( \frac{dC_s}{dt} \right) + \varphi^{-1} \tau_{xx} q^* \right] d\xi$$

b)  $B_i \gg 1$ , când îndepărtarea căldurii de la suprafața filamentului este aproape instantanee. Pentru  $B_i \rightarrow \infty$  avem:

$$\frac{T(x, r) - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_k} \cdot \frac{I_0(\mu_k r / R)}{I_1(\mu_k)} \exp(-\mu_k^2 \lambda x / \varphi C_p V R^2) \quad (5.21)$$

cu valorile proprii determinate de:

$$I_0(\mu_k) = 0 \quad (5.22)$$

În acest caz valorile proprii determinate de ecuația de mai sus sunt constante și soluția este mai simplă. Acest caz corespunde proceselor de formare în care filamentele groase sunt îmbibate cu mediu lichid (valori mari  $\alpha^*$ ). Astfel, în cazurile filării corzilor din topitură în apă, etirării cablurilor groase în băi lichide, etc., distribuția radială a temperaturii joacă un rol important și când se suprapune pe câmpul tensiunilor și deformărilor poate să conducă la filamente cu textură diferențiată radial.

### 5.3.2. Transferul de masă

Există o analogie cu transferul de căldură, soluția aplicându-se și la difuzie (ambele procese sunt descrise de aceeași ecuație cu derivate parțiale).

Ecuația difuziei este:

$$\rho \frac{\Delta c_s}{\Delta t} = -\text{div } j_s = \varphi \text{ div}(D^* \nabla c_s) \quad (5.23)$$

unde:

$c_s$  – concentrația solventului;

$j_s$  – fluxul total al solventului;

$D^*$  - coeficientul de difuzie.

Considerând  $D^*$  constant, neglijând difuzia în lungul filamentului și prin înlocuirea derivatei materiale prin  $v(\partial C_s / \partial k)$  se obține:

$$\frac{\partial c_s}{\partial x} = \frac{\Delta^*}{V} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial c_s}{\partial r} \right) \quad (5.24)$$

Condițiile la limită sunt analoage cu cele pentru transferul de căldură:

$$\begin{aligned}
 c_s(0, r) &= c_0 \\
 (\partial c_s / \partial r)_{r=\infty} &= 0 \\
 (\partial c_s / \partial r)_{r=R(x)} &= -[c_s(x, R) - c_\infty] \frac{\beta^*}{D^*}
 \end{aligned}
 \tag{5.25}$$

În aceste condiții  $c_0$  și  $c_\infty$  reprezintă, respectiv, concentrația solventului în faza inițială (soluția de filat) și în mediul înconjurător (mediul de formare), iar  $\beta^*$  este coeficientul de transfer de masă de la suprafața filamentului.

Soluția ecuației cu derivate parțiale este similară cu cea de la transferul de căldură:

$$\frac{c_s(x, r) - c_\infty}{c_0 - c_\infty} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_k} \cdot \frac{I_1(\mu_k) \cdot I_0(\mu_k r / R)}{I_0^2(\mu_k) + I_1^2(\mu_k)} \exp\left[-\int_0^x (\mu_k^2 D^* / VR^2) d\xi\right] \tag{5.26}$$

unde  $\mu_k$  sunt valorile proprii, determinate din ecuația:

$$\mu_k I_1(\mu_k) = (\beta^* R / D^*) I_0(\mu_k) \tag{5.27}$$

Deci, distribuția concentrației este determinată de două procese: difuzia în filament (caracterizată de coeficientul de difuzie  $D^*$ ) și convecția de la suprafață la mediul de formare (caracterizată de coeficientul de transfer  $\beta^*$ ). Viteza relativă a convecției față de difuzie poate fi caracterizată de criteriul  $Sh = 2\beta^* R / D^*$ , analog criteriului  $B_i$  din transferul de căldură.

a) Dacă  $Sh \ll 1$ , concentrația medie în secțiunea filamentului  $c_s(x)$  se determină din bilanțul de masă:

$$\frac{c_s - c_\infty}{c_0 - c_\infty} = \exp\left[-\int_0^x (2\beta^* / RV) d\xi\right] \tag{5.28}$$

Ecuația de mai sus este analogă celei de la transferul de căldură. Această ecuație poate să descrie procesul de filare uscată la temperaturi mari ( $D^*$  mare).

b)  $Sh \rightarrow \infty$ , avem:

$$\frac{c_s(x, r) - c_\infty}{c_0 - c_\infty} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_k} \cdot \frac{I_0(\mu_k r / R)}{I_1(\mu_k)} \exp(-\mu_k^2 D^* x / VR^2) \quad (5.29)$$

cu valorii proprii determinate de:

$$I_0(\mu_k) = 0 \quad (5.30)$$

### 5.3.3. Tranziții de fază și procese însoțitoare

Sistemele condensate de polimeri (soluții concentrate, topituri, etc.) rareori se găsesc în echilibru termodinamic. De obicei, acestea sunt sisteme în neechilibru de stări mai mult sau mai puțin stabile cinetic, astfel încât comportarea fizică a unei linii de filare sau etirare este determinată de transformările instantanee, depinzând de timp. Acestea se aplică la cristalizarea polimerilor și separări de fază în soluții și alte transformări de fază și structurale în filare și etirare.

Evoluția acestor transformări este determinată de două grupuri de factori. Primul grup constă în factori termodinamici, care determină condițiile de echilibru și definesc posibilitățile potențiale de transformări de fază. În cazul unui polimer pur, temperatura de topire  $T_i$  determină condițiile critice ale transformării de fază (topirea); pentru un sistem binar polimer-solvent, temperatura și compoziția caracterizează domeniul de miscibilitate; în cazul sistemelor multicomponente mai multe variabile sunt necesare pentru a descrie echilibrul de fază. Dacă se convoc aceste condiții de echilibru se poate determina dacă este posibilă sau nu o transformare de fază într-un domeniu de condiții tehnice date.

Sunt situații tehnice unde nu sunt posibile transformările de fază și formarea fibrelor are loc fără modificări de stare (sau fază). Un exemplu este filarea topiturilor necristalizabile cum ar fi PS atactic. Pe de altă parte, tranzițiile posibile termodinamic nu pot fi realizate totdeauna practic datorită unor factori cinetici. Spre exemplu, filamentele fine de PET filate

din topitură sunt de obicei amorfe, datorită unei viteze de cristalizare foarte mici, deși starea de echilibru la temperatura camerei corespunde unei cristalinități ridicate.

Un element foarte important este stabilitatea cinetică a stărilor de fază sau structurale. Din punct de vedere pur termodinamic, toate stările deasupra echilibrului sunt nestabile. Totuși, în sistemele formate din polimeri, viteza tranzițiilor de fază este foarte sensibilă la mobilitatea moleculară și devine practic zero sub temperatura  $T_g$ . Sistemele care ating această temperatură pot fi considerate cinetic stabile, indiferent cât de departe sunt de adevăratul echilibru termodinamic. Prin urmare, tranziția sticloasă (care nu este o transformare de fază) joacă un rol important în cinetica altor tranziții.

Pentru a ilustra aceasta, să considerăm ca exemplu răcirea topiturii unui polimer cristalizabil de la o temperatură inițială  $T_0$  la o temperatură finală a mediului ambiant  $T_\infty$ , ca în figura 5.2.

Curbele superioare reprezintă curbele de răcire, iar cele inferioare caracteristicile de cristalizare. În ambele cazuri,  $T_0$  este mai mare ca temperatura de echilibru  $T_i$  (topire). Când este atinsă această temperatură în cursul răcirii, transformările de fază devin posibil termodinamic și încep procesele de tranziție.

În cazul (a) temperatura limită  $T_\infty$  este mai mică decât  $T_g$ . Când temperatura ajunge la  $T_g$  transformările se opresc și se obține un grad de cristalinitate constant, cinetic stabil. În acest caz, gradul de cristalinitate este realizat numai în cursul răcirii și este determinat univoc de condițiile de răcire. În cazul (b) se observă o comportare diferită, în sensul că transformările nu se opresc când s-a terminat răcirea și continuă în condiții izoterme. Deci, sistemul nu este stabil cinetic la  $T_\infty$ , iar gradul de transformare real depinde de răcire și condiționarea izotermă realizată în continuare. În primul caz se încadrează PET-ul cu  $T_g = 67-81^{\circ}\text{C}$ , iar în al doilea PVC-ul cu  $T_g = -17^{\circ}\text{C}$ .

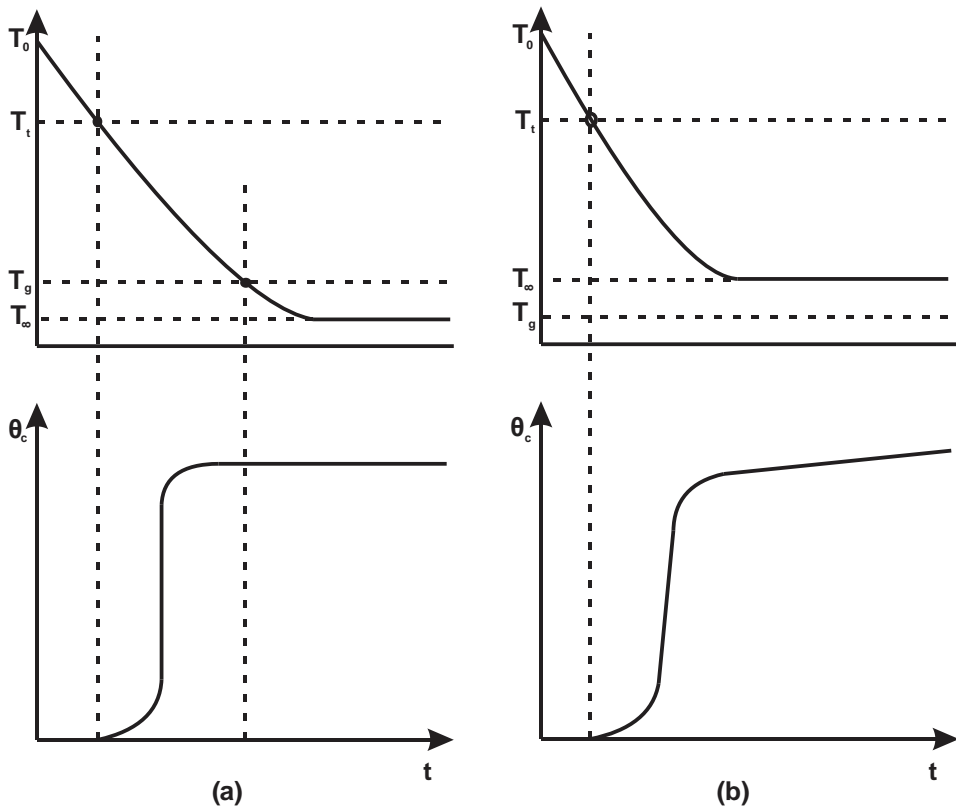


Figura 5.2. Răcirea topiturii unui polimer cristalizabil

Tranziția sticloasă depinde de temperatură și compoziție, astfel încât situația prezentată în figura de mai sus se aplică și la filarea din soluție, unde  $T_t$  și  $T_g$  se înlocuiesc cu  $l_t$  și  $c_g$ , care definesc echilibrul termodinamic.

Din punct de vedere a stabilității cristalelor, materialele filate din topitură se împart în:

- 1) necristalizabile (PS atactic, sticle anorganice);
- 2) cristalizabile, cinetic stabile la temperatura de filare ( $T_g > T_\infty$ ) (poliesteri, PS stereoregulat, poliamide în stare absolut uscată);
- 3) cristalizabile, cinetic nestabile ( $T_g > T_\infty$ ) (poliolefine, poliviniliden clorură, poliamide în prezența umidității)

Această clasificare este foarte importantă pentru a stabili care sunt condițiile de filare și condiționare.

Tranziția structurală, care joacă un rol important pentru procesul de solidificare din soluție, este așa-numita gelifiere sau gelatinizare. Aceasta nu este o tranziție de fază, ci o reacție cvasichimică care conduce la un număr infinit de legături secundare de tip Van der Waals. Formarea acestor legături este asociată cu creșterea rapidă a vâscozității newtoniene, apariția unui modul ridicat și afectează puternic cursul solidificării și mecanica formării fibrelor.

În sistemele ternare sau multicomponente formate din polimer (P), solvent (S) și un precipitant sau nesolvent (N) sunt posibile mai multe tranziții de fază. În filarea umedă, precipitarea polimerului, care este determinată de difuzie, este importantă pentru cinematica filării, structura macroscopică a fibrelor rezultate și proporțiile lor fizice.

După cum se vede din figura de mai jos, în cazul filării din soluție există mai multe posibilități sau căi de precipitare, care diferă prin calitatea finală a produsului.

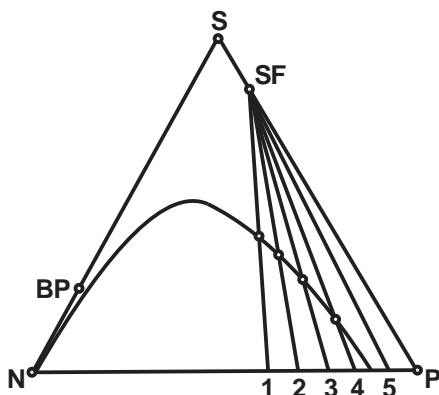


Figura 7.3. Diagrama de fază a unui sistem ternar polimer (P), solvent (I) și nesolvent (N).  $SF$  – soluție de filare;  $BP$  = baie de precipitare;  $SF_1$ ,  $SF_2$ ,  $SF_5$  – diferite trasee de filare sau căi de precipitare

## 5.4. Filarea din topitură

### 5.4.1. Considerații generale

Filarea din topitură implică următoarele faze:

- prepararea fluidului de filare (topirea polimerului);
- extruderea topiturii printr-o filieră în camera de răcire sau formare;
- înfășurarea filamentelor.

Topitura de polimer este extrudată la o temperatură constantă  $T_0$ , cu debit masic constant  $M_p$  și viteză de extrudare  $v_0$ . Dispozitivul de înfășurare, montat la distanța  $L$  de filieră, asigură viteza constantă  $v_L$ , corelată cu grosimea filamentelor  $d_L$ . Pe lungimea liniei de filare, de la  $x=0$  la  $x=L$ , jetul de topitură este deformat, răcit, solidificat și transformat într-un filament cu structură supramoleculară.

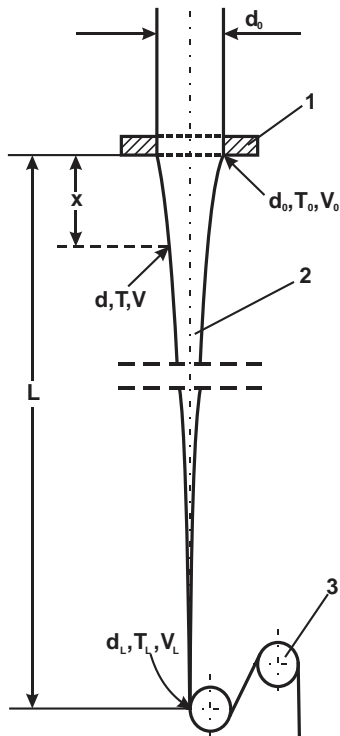


Figura 5.4. Schema de principiu a procesului de filare din topitură;  
1 – filieră; 2 – filament;  
3 – dispozitiv de înfășurare sau recepție.



Solidificarea în cazul filării din topitură este datorată exclusiv transferului de căldură. Filarea monofilamentelor fine, a multifilamentelor și a fibrelor textile se realizează în mediu gazos (aer, vapori de apă) în camere de răcire de 2-5 m lungime. Viteza și stabilitatea procesului de răcire este controlat uneori cu ajutorul unui curent de aer transversal. Materialele cu timpi de relaxare foarte lungi și capacitate redusă de filare (poliolefine cu masă moleculară mare) se filează deseori în celule încălzite pentru a reduce viteza de răcire și solidificare. Pe de altă parte, filamentele groase sau corzile se filează în băi lichide (apă) unde transferul de căldură este foarte rapid.

Viteza de filare  $v_L$  este cuprinsă la filarea din topitură între 30-100 m/minut (monofilamente groase în băi lichide) până la câteva mii de m/minut (filamente fine în mediu gazos).

Vitezele mari de filare, lipsa materialelor auxiliare (solvenți, agenți de precipitare, etc.) și simplitatea instalației fac ca filarea din topitură să fie procedeul cel mai economic de fabricare a fibrelor. Singura limitare este determinată de material, care trebuie să permită formarea unor topituri stabile termic și filabile. Materialele tipice sunt policondensatele (poliamide, poliesteri), poliolefinele liniare, sticla organică. Recent a început să se aplice la filarea topiturilor metalice.

În filarea din topitură nu are loc transferul de masă între linia de filare și mediul de formare. Deci, condiția de continuitate, în condiții staționare, este:

$$\rho(x) A(x) v(x) = M_p = \text{constant} \quad (5.31)$$

unde  $A$  și  $v$  sunt secțiunea și viteza, iar  $\rho$  este densitatea.

Principalele variabile ale procesului de filare din topitură sunt prezentate în figura 5.5. Deci, avem trei tipuri de variabile:

- primare sau parametri tehnici predeterminați care acționează drept condiții la limită sau inițiale pentru ecuațiile dinamice (caracteristicile materialului, condițiile extruderii, înfășurării, etc.)
- secundare, corelate cu cele primare prin ecuația de continuitate sau alte relații similare;
- rezultante, determinate de cele primare și cinetica solidificării, transformările de fază și structurale, etc.

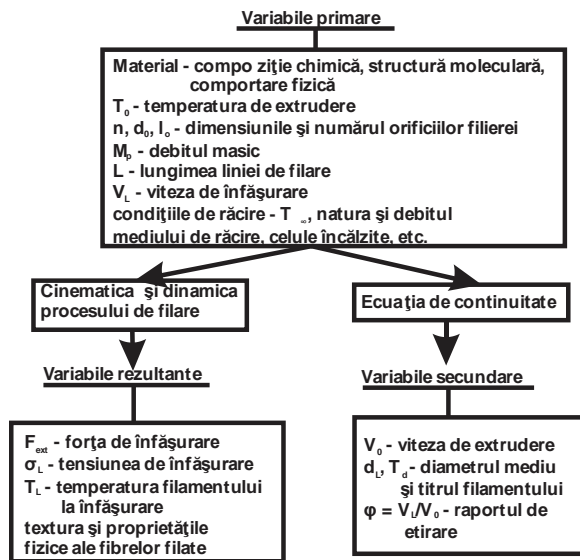


Figura 5.5. Principalele variabile de proces în filarea din topitură

#### 5.4.2. Transferul de căldură la filarea din topitură

Transferul de căldură la filarea din topitură implică diferite mecanisme: radiație, convecție liberă și forțată. Coeficientul de transfer aparent pentru radiații este:

$$\alpha_{red}^* = const \frac{T^4 - T_\infty^4}{T - T_\infty} \quad (5.32)$$

fiind puternic dependent de temperatura  $T$  a corpului.

În cazul filării metalelor sau sticlei anorganice, unde temperatura atinge 900-1300 K, contribuția acestuia este considerabilă. În cazul polimerilor organici (temperatura de extrudare fiind  $T=500-600$  K), efectul radiației este apreciabil numai în perioada inițială a răcirii, dar chiar și în acest caz nu depășește 10-15% din coeficientul convectiv de transfer.

Convecția liberă, determinată de mișcarea mediului este mecanismul tipic pentru sistemele staționare. În tabelul 5.1 se dă criteriul Nu pentru diferite cazuri, în care avem:

$Re_f$  - criteriul Re bazat pe diametrul filamentului;

$Re_c$  – criteriul Re bazat pe viteza  $v_c$  a unui curent de aer perpendicular pe filament;

$Re_p$  – criteriul Re bazat pe viteza  $v_c$  a unui curent de aer paralel cu filamentul;

$\zeta$  – parametru unic pentru criteriul Nu determinat de relația:

$$\xi = 8 \sqrt{\frac{x}{Re \cdot d}} \quad (5.33)$$

Tabelul 5.1.

Mecanismul transferului de căldură și condiții	Criteriu Nu	Domeniu de valabilitate	Metoda
1. Radiații	$Nu = \text{const} \cdot d (T^4 - T_\infty^4) (T - T_\infty)$	-	Teoria radiației
2. Convecție liberă peste sârmă fină	$Nu = \text{const} \cdot (\Delta T \cdot d^3)^{1/3}$ $Nu = 0,65 (C_n \cdot Pr)^{0,07}$	$4 \cdot 10^{-5} < C_n \cdot Pr < 10^{-2}$	Corelație empirică
3. Convecție forțată, sârmă staționară, curent	$Nu = 0,516 Pr^{0,3} Re_p^{0,43}$		Corelație

aer paralel			
4. Cilindru mobil în aer staționar	$Nu=f(\zeta)$	$0,6 < \zeta < 200$	Teoria stratului limită staționar
5. Mișcarea axială a filamentului în aer staționar	$Nu = \begin{cases} 0,72 \\ 37,8\xi^{-1} \\ 3,2 \cdot 10^3 \xi^{-2} \end{cases}$	$\zeta < 56,6$ $56,6 < \zeta < 89,4$ $\zeta > 89,4$	Corelație
6. Mișcarea axială a filamentului în aer staționar	$Nu=0,25+0,15Re_f^{0,36}$	$1 < Re_f < 10$	Corelație

În tabelul 5.2 se dau valorile criteriului Nu calculate cu diferite ecuații din tabelul 5.1 pentru filarea din topitură a mono- și multifilamentelor (răcirea în aer staționar  $T_\infty = 27^\circ\text{C}$ ).

Tabelul 5.2

Condițiile filării	Monofilamente	Multifilamente
$v_L$ (m/minut)	1000	750
$d_L$ ( $\mu\text{m}$ )	95	40
$Re_f$	112	35,4
$(L/d) \cdot 10^4$	4,73	11,25
Z	164,4	451
Cifra Nu		
1) ( $T=277^\circ\text{C}$ )	0,054	0,023
2)	0,600	0,432
3)	3,53	2,15
4)	0,118	0,016
6)	1,07	0,791

### 5.4.3. Filarea din topitură nestaționară

În acest paragraf vor fi tratate câteva probleme legate de filarea nestaționară și care se reflectă în obținerea unor fibre neuniforme și neregulate.

Problemele legate de stabilitatea și regularitatea proceselor de filare sunt:

- 1) oscilațiile condițiilor externe care conduc la variația formei, grosimii și a structurii interne a filamentelor neetirate;
- 2) instabilitatea hidrodinamică asociată cu creșterea spontană a perturbațiilor induse de condițiile la limită;
- 3) ruperea liniei de filare (capacitatea limită de filare).

#### 5.4.3.1. Ecuațiile fundamentale ale filării nestaționare din topitură

Filarea staționară constă în satisfacerea condiției:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\bar{v}, \tau, R, T, \dots] = 0 \quad (5.34)$$

unde  $\bar{v}$ ,  $\tau$ ,  $R$ ,  $T$  sunt viteza, tensiunea, raza filamentului, etc. În condiții industriale normale este de dorit ca această condiție să fie cât mai precis îndeplinită. Totuși, totdeauna, există unele variații în condițiile tehnice (extruderea, înfășurarea, răcirea) sau variații ale calității materialului alimentat care introduc abateri de la această condiție. Ecuația de mai sus este nesatisfăcută numai la filarea firelor texturate cu variații regulate, periodice, a grosimii filamentului.

Tratamentul teoretic exact al filării nestaționare necesită rezolvarea unui sistem simultan de ecuații diferențiale în timp și spațiul de filare.

Ecuația de continuitate în condiții staționare este (cu  $\rho$  constant):

$$\frac{\partial}{\partial t} (R^2) + \frac{\partial}{\partial x} (\bar{v}R^2) = 0 \quad (5.35)$$

Forma integrală a ecuației de mișcare conține în plus un termen inerțial:

$$-\pi\rho\Delta(VR^2)/\Delta t = -\Delta M/\Delta t \quad (5.36)$$

Ecuațiile reologice constitutive nu se modifică în filarea nestaționară. Vâscozitatea  $\eta^*$  (ca și timpul de relaxare  $\tau$ ), datorită neomogenității materialului extrudat poate să fie funcție de poziție și timp, adică:

$$\eta^* = \eta^*[\bar{T}(x,t), x, t] \quad (5.37)$$

Ecuația energiei este:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} = 2\alpha^*(\bar{T} - T_\infty) / \rho C_p R \quad (5.38)$$

unde coeficientul de transfer este o funcție de  $t$  și  $x$ :

$$\alpha^* = \alpha^*[\bar{v}(t,x), R(t,x), x, t] \quad (5.39)$$

și în general  $\rho$ ,  $C_p$  și  $T_\infty$  sunt funcții de  $t$  și  $x$ .

În cazul cel mai simplu, când se neglijează toți termenii inerțiali, frecarea cu mediul, termenul gravitațional și tensiunea superficială, iar fluidul este newtonian, se obține un sistem de trei ecuații cu derivate parțiale.

$$\frac{\partial R}{\partial t} + \bar{v} \left( \frac{\partial R}{\partial x} \right) + \left( \frac{R}{2} \right) \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) = 0 \quad (5.39.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ R^2 \eta^*(T, x, t) \cdot \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \right] = 0 \quad (5.39.2)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{v} \left( \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right) + 2\alpha^*(\bar{v}, R, x, t) \cdot (\bar{T} - T_\infty) / \rho C_p R = 0 \quad (5.39.3)$$

### 5.4.3.2. Stabilitatea hidrodinamică a filării din topitură

Dacă se consideră perturbații mici ale vitezei, razei filamentului și a temperaturii,  $\varepsilon_V$ ,  $\varepsilon_R$ ,  $\varepsilon_T$  vom avea condițiile:

$$v(x, t) = v_{st}(x) [1 + \varepsilon_V(x, t)] \quad (5.40)$$

$$R(x, t) = R_{st}(x) [1 + \varepsilon_R(x, t)] \quad (5.41)$$

$$T(x, t) - T_\infty = [T_{st}(x) - T_\infty] \cdot [1 + \varepsilon_T(x, t)] \quad (5.42)$$

Vâscozitatea newtoniană se consideră dependentă de temperatură:

$$\eta^* = const \cdot \exp \left[ -k \left( \bar{T} - T_\infty \right) / (T_0 - T_\infty) \right] \quad (5.43)$$

S-a constatat că în ecuația de mișcare se pot neglija gravitația și tensiunea superficială, obținându-se forma simplificată:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ R^2 \eta^* \cdot (\partial v / \partial x) \right] = \rho R^2 \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + v (\partial v / \partial x) \right] \quad (5.44)$$

care se vede că diferă de ecuația (5.39.2) prin termenul inerțial din membrul drept. Se mai pot considera și ecuațiile de continuitate și ecuația energiei, adică (5.39.1) și (5.39.2). Substituind ecuațiile (5.40)-(5.42) în (5.39.1), (5.39.2) și (5.44) se obține un nou sistem de ecuații pentru perturbațiile introduse, care după liniarizare se rezolvă numeric cu condițiile la limită:

$$\begin{cases} \text{la } x = 0, \varepsilon_V(x, t) = \varepsilon_T(x, t) = 0; \varepsilon_R(x, t) = \sin(\omega t) \\ \text{la } x = L, \varepsilon_V(x, t) = \varepsilon_R(x, t) = 0 \end{cases} \quad (5.45)$$

Deci, se introduc variații sinusoidale ale diametrului jetului.

În spațiul condițiilor de filare se pot distinge două zone:

- o regiune în care amplitudinea perturbațiilor tinde spre o stare stabilă, staționară;
- una în care perturbațiile cresc infinit în timp (soluții divergente pentru  $\varepsilon_V$ ,  $\varepsilon_R$ ,  $\varepsilon_T$ )

Pentru condițiile arătate mai sus, Shash și Pearson au obținut corelații ale etirării critice  $E_{cr}$  cu un singur grup adimensional.

$$E_{cr} = f \left[ kSt \exp(-St) + 4 Re \exp(ke^{-St}) \right] \quad (5.46)$$

unde:

$$k = -(T_0 - T_\infty) \left[ d(\ln \eta^*) / dT \right]$$

$$St = 2\alpha^*(x=0)L / C_p R_0 V_o, \text{ criteriul Stanton} \quad (5.47)$$

$$Re = \rho L V_0 / 3\eta(T = T_\infty), \text{ cifra Re la filare}$$

Deoarece vâscozitatea la sfârșitul liniei de filare este practic infinită (vâscozitatea polimerului solid) cifra Re este neglijabilă încât avem:

$$E_{cr} = f \left[ kSt \exp(-St) \right] \quad (5.48)$$

În figura (5.6) se reprezintă variația etirării critice  $E_{cr}$  în funcție de  $k \cdot St \cdot \exp(-St)$ , în care se pun în evidență două regiuni. Se observă că la valori mai mari de 0,6 filarea din topitură este stabilă, chiar pentru valori foarte mari ale etirării. Condițiile industriale ale filării din topitură corespund la  $St=1-10$ , iar dependența de temperatură a vâscozității implică  $k=2-5$ . Acestea corespund la valori  $St=10^{-3}-1,5$ .

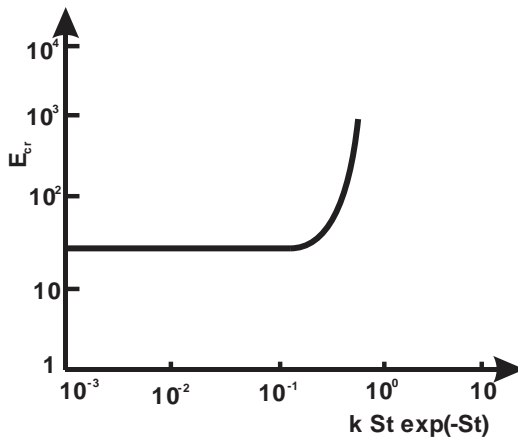


Figura 5.6. Variația etirării critice



Rezolvând ecuațiile fundamentale ale filării nestaționare se pot determina regiunile filării instabile pentru toți polimerii filăți industrial. Unele rezultate sunt prezentate în figura de mai jos.

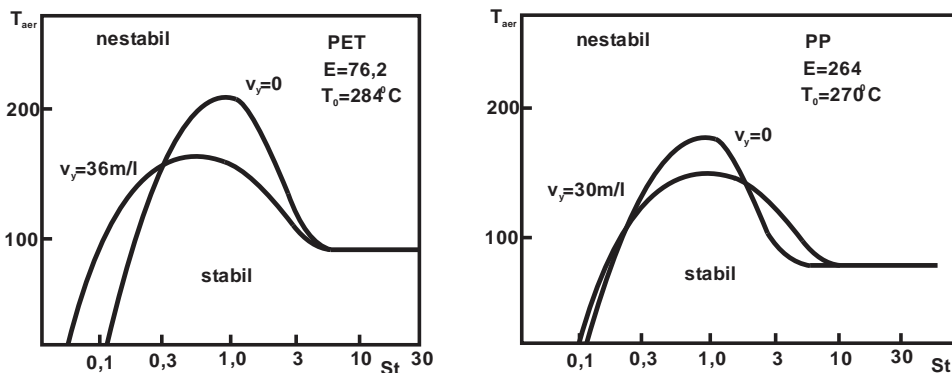


Figura 5.7. Regiuni de stabilitate pentru filarea din topitură a PET și PP;  
 $E=v_L/v_0$ ,  $T_0$  - temperatura de extrudare,  $v_y$  – viteza aerului.

Se pot pune în evidență următorii factori:

- cifra Stanton,  $St$ ;
- temperatura aerului;
- viteza curentului perpendicular de aer.

Se observă că la temperaturi mari ale aerului, filarea devine nestabilă. Efectul vitezei aerului se caracterizează prin stabilizare în domeniul cifrei  $St$  mici și destabilizare la  $St$  mari.

Rezultatele teoretice au fost verificate de datele experimentale ale lui Kase prin filarea PET și PP.

#### ***5.4.3.3. Originea fibrelor neregulate și neuniforme***

Există mai multe cauze ale neregularității și neuniformității fibrelor, care pot fi grupate în:

- 1) heterogeneitatea topiturii;
- 2) variația în timp a variabilelor de proces;
- 3) instabilitatea curgerii prin canalele filierei;
- 4) dimensiuni neuniforme ale canalelor filierei;
- 5) instabilitate hidrodinamică a filării.

### **5.5. Filarea din soluție (umedă și uscată)**

#### ***5.5.1. Introducere***

Filarea din soluție se aplică în cazul polimerilor care nu formează topituri stabile, vâscoase, dar se pot dizolva la concentrații suficient de mari în lichide cu masă moleculară mică.

Dacă polimerul este solubil într-un solvent volatil (eter, acetonă, alcooli, tetrahidrofuran, etc.) se utilizează filarea uscată. Schema de principiu a filării uscate este dată mai jos.

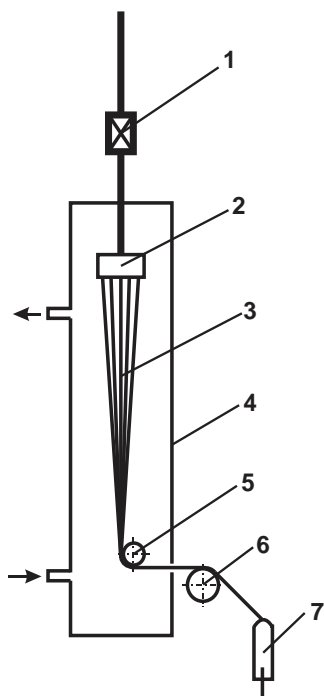


Figura 5.8. Schema de principiu a filării uscate: 1 – pompetă de dozare; 2 – filieră; 3 – linie de filare; 4 – tub (cameră) de uscare sau formare; 5,6 – role conducătoare; 7 – dispozitiv de recepție.

Filarea uscată constă în extruderea filamentelor într-o cameră de uscare unde solventul din soluție se evaporă și este antrenat de gazul cald (aerul cald). Ca urmare, jetul de soluție se concentrează și se solidifică. Vitezele de filare realizate în filarea uscată ating vitezele obținute în filarea din topitură ( $10^2 - 10^3$  m/minut). Concentrația polimerului în soluția de filat ajunge la 15 – 40 % ceea ce corespunde la vâscozitatea de extrudere de 300 – 5000 P. Temperatura mediului de formare la intrare variază în funcție de polimerul filat și solvent, în limitele 100 – 250°C. Etirarea, ca în cazul filării din topitură, se realizează de regulă ca operație separată, deseori după îndepărtarea solventului din filamente prin uscare sau spălare.

Tehnologia filării uscate este mai complexă ca cea din topitură. Cinetica solidificării implică un proces în plus, transferul de masă, astfel încât trebuie să se realizeze recuperarea și recircularea solventului. La

început s-a aplicat la fabricarea mătasei chardonnet, care se fila dintr-o soluție de nitroceluloză în alcool-eter. În prezent se utilizează la fabricarea fibrelor din acetat de celuloză (mătase acetat), PVC, polimeri și copolimeri ai clorurii de vinil, PAN și altele.

O altă variantă fundamentală a filării din soluție este filarea umedă, care se aplică la polimerii care nu se topesc, dar se dizolvă numai în solvenți nevolatili sau nestabili termic.

Filarea umedă constă în extruderea soluției de polimer într-o baie de coagulare sau precipitare care conține substanțe cu masă moleculară mică miscibile cu solventul, dar care nu dizolvă polimerul (nesolvent). În această baie de coagulare polimerul precipită din soluție formându-se un filament – gel care conține mari cantități de solvent și agent de precipitare.

Există multe variante tehnologice ale filării umede. Baia de coagulare poate să fie orizontală sau verticală (cu deplasarea filamentelor în sus sau în jos), individuală sau comună mai multor locuri sau posturi de filat. De asemenea, se pot utiliza una sau mai multe băi de coagulare. Restul operațiilor (etirarea, spălarea, uscarea, termofixarea, etc.) pot fi realizate continuu sau periodic.

În figura 5.9 se prezintă o schemă de principiu a filării din soluție cu baie de coagulare orizontală și o baie de plastifiere.

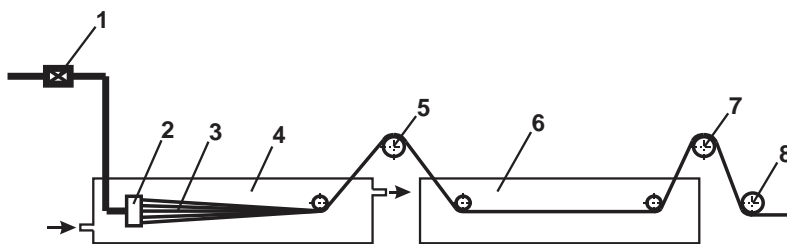


Figura 5.9. Schema de principiu a filării din soluție prin procedeul umed:  
1 – pompă; 2 – filieră; 3 – linie de filare; 4 – baie de coagulare; 5 – galeț conducător; 6 – baie de plastifiere; 7,8 – galeți de etirare.

În filarea din soluție prin varianta umedă se utilizează soluții mai diluate. Concentrația polimerului variază între 5 – 30 %, iar vâscozitatea de extrudare variază între 20 – 5000 P. Temperatura băii de coagulare nu depășește de regulă 0 – 150°C. Vitezele maxime de filare sunt limitate de frecările hidrodinamice din baia de coagulare și rareori sunt mai mari de 50 – 100 m/minut.

Filarea umedă, aplicată printre altele la filarea vâscozei, soluției cuproamoniaceale, proteinelor, PAV, PAN, PVC, etc. este procesul de filare cel mai complex. Problema cea mai importantă este controlul structurii morfologice ale fibrelor, foarte sensibilă la compoziția băii de coagulare.

Există și o variantă uscat – umedă a filării din soluție, când soluția este extrudată într-un mediu de aerosoli (1 – 20 cm lungime), după care solidificarea se realizează într-o baie lichidă.

## 5.5.2. Dinamica și cinematica filării din soluție

### 5.5.2.1. Forțele care acționează pe linia de filare

Bilanțul general al forțelor poate fi scris în forma:

$$F_{ext} + F_{grav} = F_{sup} + F_{in} + F_{aer} + F_{re} \quad (5.49)$$

în care termenii reprezintă tensiunea sau forța externă, forța gravitațională, tensiunea superficială, forța inerțială, frecarea cu aerul și forțele reologice.

Diferența dintre filarea din topitură și sistemele de filare din soluție constă în termenii inerțial și frecarea cu mediul de formare.

$$F_{aer}(x) = \int_0^x \tau_{rx,s} \cdot 2\pi R dx \quad (5.50)$$

unde  $\tau_{rx,s}$  este tensiunea la suprafața jetului.

$$\tau_{rx,s} = \eta^0 \left( \frac{\partial V^0}{\partial r} \right)_{r=R} \quad (5.51)$$

În cazul vitezelor mici de transfer de masă se poate utiliza formula lui Sakiadis:

$$F_{aer} = const \cdot V^{1,082} \cdot R^{0,264} \cdot L^{0,918} \quad (5.52)$$

unde  $v$ ,  $R$  și  $L$  sunt viteza și dimensiunile unui cilindru care se mișcă într-un mediu infinit.

### 5.5.2.2. Condițiile de continuitate în filarea din soluție

Condițiile de continuitate în filarea din soluție sunt exprimate de ecuația de continuitate pentru un component și pentru totalitatea acestora:

$$\frac{\Delta \rho_i}{\Delta t} + \rho_i \operatorname{div} V_i = 0 \quad (5.53)$$

$$\frac{\Delta \rho}{\Delta t} + \rho \operatorname{div} V = 0 \quad (5.54)$$

Dacă se presupune  $\rho$  constantă și  $v$  și  $\rho$  simetrice în secțiunea filamentului, prin integrarea ultimei ecuații se obține:

$$\pi \rho \frac{\partial}{\partial x} (VR^2) + 2\pi R \rho \frac{V_n}{\cos \alpha} = 0 \quad (5.55)$$

unde  $v_n$  este componenta normală a vitezei la suprafața filamentului, iar  $\alpha$  este unghiul de convergență a filamentului.

Pentru filamentele aproape cilindrice:

$$\pi \rho \frac{\partial}{\partial x} (VR^2) + 2\pi R \rho V_n = 0 \quad (5.56)$$

Dar fluxul masic  $j$  este:

$$j = \rho V_n \text{ <mol/m}^2 \cdot \text{s>} \quad (5.57)$$

$$A = \pi R^2$$

și 
$$\rho \frac{\partial}{\partial x} (VA) + 2\pi R j(k) = 0 \quad (5.58)$$

este clar că distribuția vitezei și a grosimii pe linia de filare depinde de intensitatea transferului de masă, care este funcție de fluxul masic  $j(x)$ . De asemenea, trebuie îndeplinită și condiția de continuitate pentru polimer (debit constant):

$$\rho_p V_p A = M_p = \text{const} \quad (5.59)$$

ceea ce presupune că polimerul se găsește numai în linia de filare.

Din punct de vedere reologic avem:

$$F_{re} / A = \tau_{xx}(x) = \eta^* \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad (5.60)$$

Densitatea relativă a polimerului pe linia de filare este:

$$\rho^* = \frac{\rho_p V_p}{\rho V} \quad (5.61)$$

Combinând penultimele două ecuații și integrând cu condițiile la limită:

$$V(x=0) = V_0; A(x=0) = A_0 \quad (5.62)$$

rezultă distribuția vitezei și a secțiunii transversale.

$$\begin{aligned} A &= \frac{F_{re}}{\eta^* \frac{\partial V}{\partial x}} \\ \rho_p V_p \frac{F_{re}}{\eta^* \frac{\partial V}{\partial x}} &= M_p \Rightarrow \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\rho_p V F_{re}}{\eta^* M_p} = \frac{\rho V \rho^* F_{re}}{\eta^* M_p} \Rightarrow \\ \int_{V_0}^V \frac{dV}{V} &= \frac{\rho}{M_p} \int_0^x \frac{\rho^* F_{re}}{\eta^*} dx \Rightarrow \ln \frac{V}{V_0} = \frac{\rho}{M_p} \int_0^x \frac{\rho^* F_{re}}{\eta^*} dx \\ \frac{V}{V_0} &= \exp \left[ \frac{\rho}{M_p} \int_0^x \left( \frac{F_{re} \rho^*}{\eta^*} \right) dx \right] \end{aligned} \quad (5.63)$$

De asemenea, avem pentru secțiune  $\rho_p V_p A = \text{constant}$ , dar  $\rho_p V_p = \rho V \rho^*$ ;  $\rho^* \rho V A = \text{constant} \Rightarrow \rho^* V A = \text{constant}$  ( $\rho = \text{constant}$ ), deci:

$$\rho_0^* V_0 A_0 = \rho^* V A \Rightarrow \frac{A}{A_0} = \left( \frac{\rho_0^*}{\rho^*} \right) \cdot \left( \frac{V_0}{V} \right) \quad (5.64)$$

Ultimele două ecuații se aplică la filarea uscată. Se poate demonstra că în cazul filării umede se obțin aceleași ecuații, numai că se pleacă de la altă formulă pentru  $\tau_{xx,s}(x)$ .

### 5.5.2.3. Câmpul vitezei în baia de coagulare

Câmpul vitezei în baia de coagulare joacă un rol foarte important în procesul de filare din soluție. În toate analizele teoretice se consideră filamentele ca un cilindru continuu care se mișcă axial într-un mediu staționar infinit. Experiențele pe modele cu monofilamente acrilice confirmă rezultatele teoretice: distribuția radială a vitezelor în baia de coagulare este aproape logaritmică, așa cum prevede și teoria stratului limită.

În cazul sistemelor tehnice, totuși, câmpul vitezelor din baia de coagulare, care este hotărâtor pentru cinematica și dinamica procesului, este departe de modelul teoretic. În cazul filării multifilamentelor, spre exemplu, straturile limită se suprapun și formează un mediu mobil între filamente. Baia de coagulare nu este staționară și circulă cu o viteză finită. Curgerea în baie este, deci, foarte complexă; liniile de curent nu sunt paralele cu axa liniei de filare ceea ce creează condiții neegale pentru solidificarea filamentelor. O modalitate de a face curgerea cât mai simetrică constă în utilizarea unui tub adaptor în baie, așa cum se vede în figura 5.10.



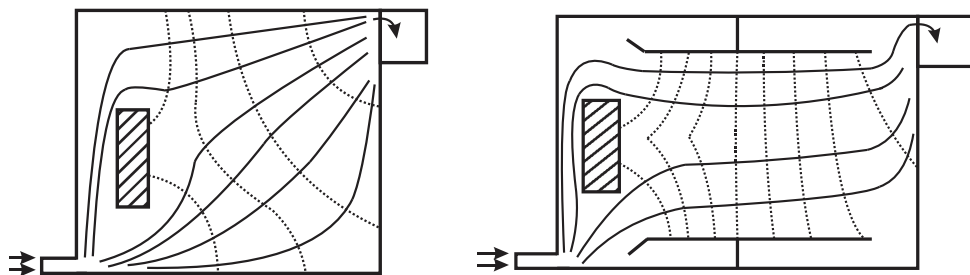


Figura 5.10. Liniile de curent într-o baie de coagulare fără și cu tub adaptor

Vinogrador și Fickhman au analizat modelul hidrodinamic al băii de coagulare cu adaptor. Ei presupun că cablul de filamente împreună cu lichidul imobilizat poate fi aproximat printr-un cilindru solid cu raza  $R_1$  și care se mișcă cu o viteză constantă  $V_1$ . Distribuția vitezelor, în baia care conține tubul adaptor, în spațiul inelar poate fi prezentată în forma ecuației:

$$V_b(r) = \frac{\Delta p}{4\eta^0 L} \left[ \frac{(R_2^2 - R_1^2) \ln(r/R_1)}{\ln(R_2/R_1)} - (r^2 - R_1^2) \right] + V_1 \frac{\ln(r/R_2)}{\ln(R_1/R_2)} \quad (5.65)$$

în care  $\eta^0$  este vâscozitatea băii,  $L$  – lungimea tubului adaptor, iar  $\Delta P$  este diferența de presiune pe lungimea acestui tub.

Se poate arăta că ecuația de mai sus rezultă din rezolvarea ecuației de mișcare în coordonate cilindrice.

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\tau_{rx} \cdot r)$$

Într-o secțiune dată (pentru un  $z$  dat)  $\partial p / \partial z$  poate fi înlocuit cu  $\Delta P / L$ , mai ales dacă avem curgere stabilizată (cu  $\Delta P$  constant):

$$\frac{\partial}{\partial r} (r \cdot \tau_{rx}) = r \frac{\Delta P}{L}$$

$$\tau = \frac{1}{2} \frac{\Delta P}{L} r + \frac{C_1}{r}$$

$$\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{1}{2\eta} \frac{\Delta P}{L} r^2 + \frac{C_1}{\eta} \frac{1}{r}$$

$$V_z = \frac{1}{4\eta} \frac{\Delta P}{L} r^2 + \frac{C_1}{\eta} \frac{1}{r}$$

Cele două constante se determină din condițiile la limită:

$$\begin{cases} r = R_1, & V = V_1 \\ r = R_2, & V = 0 \end{cases} \Rightarrow \text{ecuația (5.65)}$$

Se poate vedea că viteza băii este dată de doi termeni, primul determinat de gradientul de presiune, iar al doilea este determinat de antrenarea cablului de filamente sau termenul convectiv. Evident că debitul de baie, obținut prin integrarea vitezei pe secțiunea de curgere, va conține de asemenea doi termeni:

$$M_v = \int_{R_1}^{R_2} 2\pi R V_b(r) dr = \frac{\pi \Delta P}{8\eta L} (R_2^2 - R_1^2) \left[ R_2^2 + R_1^2 + \frac{R_2^2 - R_1^2}{\ln R_2/R_1} \right] +$$

$$+ \pi V_1 \left[ \frac{R_2^2 - R_1^2}{2 \ln(R_2/R_1)} - R_1^2 \right] = M_{vp} + M_{va} \quad (5.66)$$

Rezultatele obținute au fost verificate pe cale experimentală. S-a constatat că un parametru important este distanța  $\Delta S$  dintre intrarea în tubul adaptor și fața filierei.

Cu ajutorul funcției de distribuție a vitezei se poate calcula tensiunea de forfecare la suprafața cablului de filamente și, deci, forța de frecare a acestuia cu baia de coagulare.

$$\tau_{rx,s} = -\eta \left( \frac{\partial V}{\partial r} \right)_{r=R_1} = \frac{-\Delta P}{4L} \left[ \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_1 \ln \frac{R_2}{R_1}} - 2R_1 \right] + \frac{V_1 \eta}{R_1 \ln(R_2/R_1)} \quad (5.67)$$

$$F_{aer} = 2\pi R_1 L \tau_{rx,s} = -\pi \Delta P \left[ \frac{R_2^2 - R_1^2}{2 \ln(R_2/R_1)} - R_1^2 \right] + \frac{2\pi V_1 \eta L}{\ln(R_2/R_1)} \quad (5.68)$$

Un model hidrodinamic al filării unui cablu de filamente mai realist a fost propus de Izaniawski și Zachara care au considerat cablul ca un mediu continuu, poros, anizotrop și au determinat viteza de filtrare  $V^0$ , adică viteza relativă a băii față de filamente, din ecuația vectorială:

$$\vec{V}^0 = -\frac{A}{\eta^0} \vec{F} \nabla P \quad (5.69)$$

unde  $A$  este secțiunea transversală a cablului raportat la un filament,  $\eta^0$  este vâscozitatea mediului, iar  $F$  este coeficientul de filtrare, care în cazul filamentelor paralele este:

$$F_{||} = 2F_{\perp} = -\frac{1}{4\pi} \left( \ln \Phi + \frac{3}{2} \right); \quad \Phi \ll 1 \quad (5.70)$$

unde  $\Phi$  este fracția volumică a filamentelor din cablu.

Modelul obținut oferă o metodă simplă de rezolvare a multor probleme din filarea umedă, cum ar fi efectul geometriei cablului, proiectarea băii de coagulare, etc. asupra distribuției vitezei și a presiunii în cablu. S-a constatat, spre exemplu, că la o distanță de filieră egală cu diametrul cablului viteza radială a băii și gradientul de presiune devin practic zero. S-a mai constatat prin măsurători că în spațiul de după filieră până la 1,5 raze a cablului de filamente, gradientul de presiune variază de la ~ 10 mm la 1 mm.

Se pare că penetrarea băii în cablu este foarte slabă și poate fi puțin modificată prin intermediul vitezei băii de coagulare.

### 5.5.3. Solidificarea soluțiilor de polimer

#### 5.5.3.1. Solidificarea în filarea uscată

Mecanismul transferului de masă implică:

- vaporizarea solventului;
- difuzia în linia de filare;
- transferul prin convecție de la suprafața filamentului spre mediul de formare.

Vaporizarea începe imediat după ieșirea soluției fierbinți din filieră și este favorizată de decompresia acesteia.

După teoria Flory - Huggins presiunea parțială a solventului este corelată cu cea a solventului pur  $P_s^0$  după relația:

$$\ln(P_s/P_s^0) = \ln C_s + (1 - C_s)(1 - \xi) + X_{12}(1 - C_s)^2 \quad (5.71)$$

unde  $\xi$  este raportul volumelor molare ale solventului și polimerului,  $C_s$ , fracția volumică a solventului, iar  $X_{12}$  este parametrul Huggins de interacțiune polimer – solvent.

$$P_s^0 = A \exp[-B/(T + T_a)] \quad (5.72)$$

Cel de-al doilea mecanism prin care se realizează transferul de masă este difuzia în linia de filare. Aceasta se supune legii lui Fick, care pentru un cilindru infinit, în coordonate cilindrice este:

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( D^* \cdot r \frac{\partial C_s}{\partial r} \right) \quad (5.73)$$

unde  $D^*$  este coeficientul de difuzie mutuală. Soluția acestei ecuații se poate scrie ca o serie de funcții Bessel cu condițiile:

$$C_s(t = 0, r) = C_0 = \text{const} \quad (5.74)$$

$$C_s(t, r = R) = C_{s,R} = \text{const} \quad (5.75)$$

$$C_s - C_{SR} = 4(C_0 - C_{SR}) \sum_k \mu_k^{-2} \exp(-\mu_k^2 D^* t / R^2) \quad (5.76)$$

unde  $\mu_k$  sunt soluțiile ecuației:

$$I_0(\mu_k) = 0 \quad (5.77)$$

În seria de mai sus se pot neglija termenii 2, 3, .... reținând numai primul ( $\mu_k = 2,4048$ ). Exprimând timpul prin distanța axială de la filieră, utilizând condițiile de continuitate  $\rho_p V_p A = \text{constant}$  și cunoscându-se  $\rho_p = \rho(1 - C_s)$  se obține:

$$\frac{dC_s}{dx} = - \left( \frac{\pi \rho D^*}{M_p \mu_1^2} \right) (1 - C_s)(C_s - C_{S,R}) \quad (5.78)$$

În apropierea filierei, convecția solventului în faza gazoasă joacă un rol important. Condiția la limită în acest caz este:

$$D^* (\partial C_s / \partial r)_{r=R} = -\beta^* (P_{S,R} - P_{S,\infty}) / (P - P_{S,\infty}) = -j_s / \rho \quad (5.79)$$

unde  $\beta^*$  este coeficientul parțial de transfer de masă prin convecție la suprafața filamentului,  $P_{S,R}$  și  $P_{S,\infty}$  sunt presiunile parțiale ale solventului la suprafața filamentului și în mediul gazos de formare.  $P$  este presiunea totală în mediu de formare.

Integrând ecuația (5.73) pe suprafața filamentului se obține:

$$\pi R^2 V (\partial C_s / \partial x) = 2\pi R D^* (\partial C_s / \partial r)_{r=R} \quad (5.80)$$

Ultimele două ecuații nu pot fi integrate dacă nu se cunoaște implicit funcția  $C_s$ . Aceste ecuații s-au rezolvat însă numeric de către Ohzawa, Nagauo și Matsuo, care au presupus că  $P_{S,R}$  este o funcție unică de concentrația solventului în fază lichidă de la suprafața filamentului  $C_{S,R}$ .

### 5.5.4. Ecuțiile fundamentale ale filării uscate și rezolvarea lor

Pentru filarea staționară se cer determinate caracteristicile:

- viteza medie axială,  $v(x)$ ;
- raza filamentului,  $R(x)$ ;
- temperatura medie a secțiunii filamentului,  $T(x)$ ;
- concentrația medie a solventului,  $c_s(x)$ .

Ecuțiile necesare pentru determinarea acestor caracteristici pot fi determinate din ecuațiile de conservare a impulsului, masei, energiei, cât și din reologia și termodinamica sistemelor de polimeri.

Ecuția de continuitate este:

$$S \cdot v \cdot \rho = M_p$$

$$\pi R^2 v (1 - c_s) \rho = M_p \quad (5.81)$$

Bilanțul forțelor, fără tensiunea superficială este:

$$\frac{d}{dx} (\pi R^2 \tau_{xx}) - \pi R^2 v \rho \left[ (dV/dx) + 2v_n \sin \alpha / R \right] + 2\pi R \tau_{rx,s} + \pi \rho g R^2 = 0 \quad (5.82)$$

și diferă de ecuația similară pentru filarea din topitură prin termenul adițional inerțial, care este proporțional cu fluxul masic  $j_s = \rho \cdot v_n$ , normal la suprafața filamentului, care explică transferul de masă.

Ecuția constitutivă poate fi scrisă în forma dependenței newtoniene:

$$\tau_{xx} = \eta^* (dv/dx) \quad (5.83)$$

$$\eta^* = 3\eta_0 (T, c_s) \quad (5.84)$$

Ecuția energiei va trebui să țină seama de vaporizarea solventului, după cum am mai văzut mai sus:

$$\pi R^2 v \rho C_p (dT/dx) = -2\pi R \left[ \alpha^* (T - T_\infty) + \rho K_s^* J_s \right] \quad (5.85)$$

Concentrația medie a solventului este dată de ecuația difuziei integrată pe secțiunea filamentului. În concluzie, ecuația diferențială (5.80), împreună cu ecuațiile (5.81) – (5.85), cu expresiile potrivite pentru vâscozitatea elongațională  $\eta^*$ , coeficientul de frecare  $c_f$ , transferul de căldură  $\alpha^*$ , transferul de masă  $\beta^*$ , difuzia  $D^*$ , relațiile termodinamice (presiunea parțială a solventului  $P_s$ ), etc., cu condițiile la limită:

$$\begin{cases} x=0, v=v_0, R=R_0, T=T_0, c_s(r)=c_0 \\ x=L, v=v_L \end{cases} \quad (5.86)$$

se pot rezolva numeric sau cu unele simplificări analitice.

Considerațiile teoretice abordate mai sus au fost verificate de unele date experimentale. Astfel, Sano și Nishikawa au studiat uscarea picăturilor de soluție de PAV suspendate în aer. Ei au studiat variația concentrației solventului  $C_s$ , masa picăturii și temperatura acesteia și au tras concluzia că există trei faze ale transferului de masă, după cum se vede din figura 5.11:

- 1)  $0 < t < t_1$  determinată de convecție, viteza transferului de masă constantă, temperatura constantă;
- 2)  $t_1 < t < t_2$  determinată de convecție și difuzie, scăderea vitezei transferului de masă, creșterea temperaturii;
- 3)  $t_2 < t_3$  determinată de difuzia în filament, scăderea vitezei transferului de masă, creșterea temperaturii.

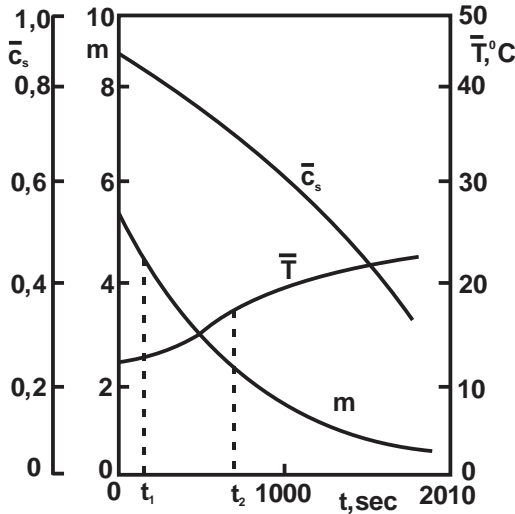


Figura 5.11. Fazele transferului de masă în cazul uscării picăturilor de soluție de PAV suspendate în aer

Autorii lucrării de mai sus au obținut relații empirice între durata treptelor individuale și parametrii de viteză ai transferului de masă:

$$\rho D^* [c_0 - c_s(t_1)] / j_s R_p = 0,24 [D^* t_1 / R_p^2]^{0,5} \quad (5.87)$$

$$\rho D^* [c_{s,R} - c_\infty] / j_s R_p = 5,64 [D^* (t_2 - t_1) / R_p^2]^{0,83} \quad (5.88)$$

unde  $R_p$  este raza picăturii sferice.

Toate datele publicate asupra filării uscate indică că mecanismul transferului de masă, care la început implică cele trei trepte – vaporizare, convecție și difuzie – tinde final spre un mecanism determinat numai de difuzie. Această concluzie are o semnificație practică deosebită: lungimea minimă a camerei de uscare necesare unei anumite concentrații reziduale a solventului este determinată de coeficientul de difuzie  $D^*$ , grosimea filamentului și viteza de filare, și nu poate fi efectiv redusă prin aplicarea unei circulații intensive a curentului de aer.



### **5.5.5. Solidificarea în filarea umedă**

Cunoștințele teoretice actuale din domeniul filării umede nu permite formularea unor ecuații cu ajutorul cărora să se descrie cantitativ procesul. Există unele îndoieli asupra deformării unui sistem neuniform constituit din linia de filare parțial solidificată și mecanismul transferului de masă, afectat de câmpul vitezei și concentrației din baia de coagulare. Echilibrul de fază și cinetica separării fazelor sunt obscure deși, neîndoielnic, joacă un rol decisiv în structura și proprietățile fibrelor. În cele ce urmează se vor prezenta unele probleme izolate din domeniul filării umede, fără a avea pretenția unei abordării sistemice.

#### **5.5.5.1. Echilibrul de fază și transferul de masă în sistemele ternare**

Separarea fazelor în sistemele multicomponente, polimer (P), solvent (S), agent de coagulare (N), afectează puternic cinetica procesului de coagulare. Structura microscopică și morfologică a „gelului de fibre” depinde nu numai de compoziția medie, dar, de asemenea, de calea pe care se ajunge la această compoziție. Este important dacă această cale spre condițiile finale intersectează curba binodală (limita domeniului bifazic față de cel monofazic) sau nu, și dacă da, la ce poziție. Este important, deci, să se cunoască cum viteza de transfer a componentilor individuali afectează cursul filării.

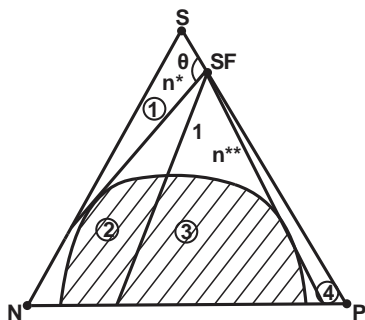


Figura 5.12. Echilibrul fazelor într-un sistem ternar polimer (P), solvent (S) și nesolvent (N)

Să considerăm un sistem ternar polimer (P), solvent (S) și nesolvent (N), ca în figura 5.12. De la starea inițială, soluție de filare (SF), sistemul suferă o modificare a compoziției în funcție de fluxul solventului  $j_s$ , și a nesolventului,  $j_n$ , orientate spre exterior, respectiv interior. Valorile fluxurilor sau a raportului lor este exprimat în funcție de unghiul  $\theta$  pe care îl face traseul de filare cu latura SP a diagramei triunghiulare.

$$\theta = 0 \Rightarrow j_s / j_n = -\infty, \text{ diluarea soluției de filat cu solvent pur};$$

$$\theta = \pi \Rightarrow j_s / j_n = \infty, \text{ evaporarea solventului.}$$

După cum se vede din figura 5.12 se pot distinge patru zone de variație a compoziției:

**Regiunea 1**,  $-\infty < j_s/j_n < n^*$ , este limitată de prima tangentă la curba de echilibru. Deoarece  $u^*$  este în general mai mic ca unitatea, în această regiune concentrația în polimer scade pe traseul de filare. Cu alte cuvinte, avem o diluție homofazică a soluției de filare fără să avem vreo posibilitate de solidificare.

**Regiunea 2**,  $n^* < j_s/j_n < 1$ ; în această regiune un traseu al operației de filare intersectează curba binodală. Conținutul de polimer scade, dar la un moment dat echilibrul se transformă într-un echilibru bifazic. Solidificarea este posibilă ca rezultate a tranzițiilor de fază, dar rezultă structuri heterogene.

**Regiunea 3**,  $1 < j_s/j_n < n^*$ , este limitată de cea de-a doua tangentă critică, polimerul se concentrează, iar traseul intră în zona bifazică. Solidificarea poate să apară atât datorită creșterii concentrației în polimer, cât și datorită tranzițiilor de fază. Se obțin structuri mai omogene ca cele din regiunea 2.

**Regiunea 4**,  $n^{**} < j_s/j_n < \infty$ , produce cele mai dense și omogene structuri.

Regiunea 1 nu oferă nici o posibilitate de filare și formare de fibre. Solidificarea soluției de polimer este posibilă în regiunile 2, 3 și 4, iar cele mai bune rezultate se obțin în regiunea 4.

Filarea uscată, la care nu avem agent de coagulare ( $j_n = 0$ ), corespunde traseului SD-P localizat în regiunea homofazică 4. Aceasta este unul din motivele pentru care structura fibrelor filate din stare uscată este mai bună și calitatea fibrelor superioară.

Deoarece în regiunea 4 raportul  $j_s/j_n$  este foarte mare, aceasta este practic inaccesibilă pentru filarea umedă.

Trebuie să subliniem că intersecția curbei binodale cu un traseu de filare (ecuație a transferului de masă) nu garantează separarea fazelor, dar indică numai posibilitatea termodinamică a acestora.

#### **5.5.5.2. Modelarea matematică a proceselor de difuzie în filarea umedă**

Ecuația generală de continuitate pentru un component  $i$  din sistem, fără convecție este:

$$\rho(\partial c_i / \partial t) + \text{div } j_i = 0 \quad (5.89)$$

unde  $j_i$  este vectorul flux a componentului  $i$ , iar  $c_i$  este concentrația acestuia. Aproape toate tratamentele teoretice privind difuzia în filarea umedă se

bazează pe un model binar solvent – nesolvent. Pentru un sistem binar avem condițiile:

$$\begin{cases} c_s + c_u = 1 \\ j_s + j_n = 0 \end{cases} \quad (5.90)$$

Trebuie notat că vectorii fluxurilor sunt considerați în sistemul cartezian, cu axa pozitivă în afara filamentului.

Ecuatiile de mai sus conduc la binecunoscuta ecuație Fick pentru cei doi componenți:

$$\begin{aligned} (\partial c_s / \partial t) &= \text{div} (D^* \nabla c_s) \\ (\partial c_n / \partial t) &= \text{div} (D^* \nabla c_n) \end{aligned} \quad (5.91)$$

unde  $D^*$  este coeficientul de difuzie pentru perechea de componenți.

Majoritatea valorilor  $D^*$  din literatură sunt determinate pe baza ecuației (5.91). Totuși, în cazul filărilor umede industriale care de regulă sunt sisteme ternare sau multicomponente, nu este satisfăcută condiția de echimolecularitate (5.90). Chiar în situațiile cu un component staționar (polimerul) niciodată nu se satisfac ecuațiile (5.90). De aici se poate trage concluzia că aplicarea ecuațiilor difuziei în forma (5.91) pare nejustificată.

Pentru un sistem cvasibinar (unul în care avem un component staționar, al treilea), fluxul solventului  $j_s$  depinde de gradientii de concentrație a ambilor componenți mobili.

$$j_s = \frac{\rho D^*}{c_s + c_n} (c_n \nabla c_s - c_s \nabla c_n) + \frac{c_s}{c_n + c_s} (j_s + j_n) \quad (5.92)$$

Se poate demonstra că în cazul unui sistem binar echimolar, ecuația de mai sus se reduce la:

$$j_i = -D^* \nabla c_i \quad (5.93)$$

și care conduce la ecuația (5.91).

Pentru rezolvarea ecuațiilor (5.89) și (5.92) se pune problema determinării fluxului nesolventului  $j_n$ . Paul D. R. a rezolvat ecuația difuziei unidimensionale cu presupunerea că  $j_n$  este proporțional cu fluxul  $j_s$ :

$$j_n = -k^* j_s \quad (5.94)$$

O altă problemă importantă în difuzia care însoțește formarea fibrelor este modificarea coeficientului de difuzie pe măsură ce progresează solidificarea. Valorile prezentate în literatură sunt valori medii. Este de așteptat ca coeficientul de difuzie să varieze cu condițiile de formare. Groke și Heyer au interpretat variațiile observate ale coeficienților de difuzie în sistemele PAN – DMA – apă cu variația razei filamentelor pe baza unei imagini de structură coajă – miez a liniei de filare. Stratul subțire, dens, format la suprafața liniei de filare se consideră că este factorul hotărâtor pentru transferul de masă datorită unei permeabilități mult mai reduse ca a porțiunii interioare (coagulată sau necoagulată). Coeficienții de difuzie ai solventului și nesolventului în stratul superficial sunt de ordinul  $2 \cdot 10^{-7}$  cm<sup>2</sup>/sec. comparativ cu  $2 - 4 \cdot 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/sec. pentru valorile medii ale  $D^*$ . Grosimea stratului superficial este de ordinul  $10^{-5}$  cm fiind funcție de unele condiții din baia de coagulare, cum este conținutul de solvent. Pe de altă parte, D. R. Paul a analizat teoretic difuzia cu limita mobilă între straturile coagulate și necoagulate presupunând diferiți coeficienți de difuzie în ambele straturi.

A treia problemă legată de teoria difuziei în filarea umedă privește condițiile la limită pe suprafața filamentului.

Când viteza transferului de masă prin convecție pe suprafața filamentului este foarte mare comparativ cu cea a difuziei din interiorul filamentului, concentrația solventului pe suprafață poate fi presupusă constantă și este determinată de concentrația media din baia de coagulare.

$$c_s(r = R, x) = \text{const.} = c_{s,\infty} \quad (5.95)$$

Profilul concentrației pentru un astfel de caz este arătat de curba 1 din figura 5.13.

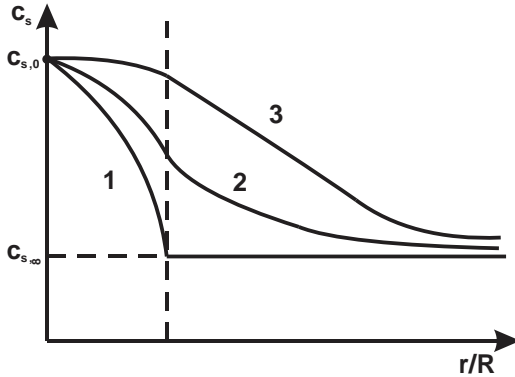


Figura 5.13. Distribuția concentrației radiale în filament și în mediul de formare corespunzător diferitelor condiții la limită

Ecuția (5.95) pare justificată când filamentul este înconjurat de un mediu turbulent sau laminar rapid.

În cazul filării unui cablu de filamente, situația este cu totul alta datorită interacțiunilor hidrodinamice care fac ca baia din cablul de filamente să aibă o cu totul altă compoziție față de cea din baia propriu-zisă.

O formulare generală a condiției la limită pentru difuzie privește gradientul concentrației radiale pe suprafața filamentului, definit din ecuația fluxului solventului de la suprafața filamentului spre baia de coagulare:

$$-j_s(r = R) = \rho D_f^* (\partial c_s / \partial r)_{r=R} \quad (5.96)$$

În cazul filării uscate, acest flux este în general convectiv și este controlat de coeficientul de transfer de masă  $\beta^*$ . În filarea umedă, fluxul convectiv joacă un rol mai puțin important.

În filarea multifilamentelor din soluție prin filare umedă, mecanismul determinant al transferului de masă spre exteriorul filamentelor pare să fie mai degrabă difuzia decât convecția. Ecuția (5.96) se reduce în acest caz la:

$$D_f^* (\partial c_s / \partial r)_f = D_b^* (\partial c_s / \partial r)_b \text{ la } r = R \quad (5.97)$$

în care  $D_f^*$  și  $D_b^*$  reprezintă coeficienții de difuzie în filament și în baia de coagulare, iar  $(\partial c_s / \partial r)$  sunt gradientii de viteză radiali la  $r = R$ . Profilul concentrației pentru acest caz este prezentat prin curba 2. Este de așteptat ca coeficientul de difuzie în filament să fie mai mic și că gradientul corespunzător de concentrație să fie mai mare decât caracteristica corespunzătoare din baia de filare. Kozenikov a rezolvat ecuația difuziei echimolare cu presupunerea că coeficienții de difuzie din filament și baie sunt egali. Aceasta este echivalent cu cel de al treilea tip de condiții la limită:

$$\begin{cases} r = R, (\partial c_s / \partial r)_f = (\partial c_s / \partial r)_b \\ r = \infty, c_s = \text{const.} = c_{s,\infty} \end{cases} \quad (5.98)$$

Profilul corespunzător al concentrației este reprezentat prin curba 3. Condițiile corespunzătoare ecuațiilor (5.95) și (5.98) descriu două cazuri asimptotice ale difuziei. Presupunerea că în filament și baie se realizează coeficienți de difuzie egali, ceea ce conduce la ecuația (5.98), pare să fie o suprasimplificare. Transferul de masă în afara filamentului este fără îndoială mai rapid decât difuzia din filament. Situația reală, descrisă de ecuația (5.96) va conduce la soluții intermediare între cazurile asimptotice (5.95) – (5.98).

În concluzie, modelele matematice utilizate pentru interpretarea difuziei în filarea umedă implică multe inconsistențe și suprasimplificări. Dezvoltarea domeniului filării umede nu este posibil fără dezvoltarea și încercarea unor modele ale difuziei mult mai precise.

### 5.5.5.3. Criterii empirice pentru forța de coagulare

Transformarea unei soluții fluide de polimer în solid sau gel de fibre este cunoscută în literatură drept coagulare. S-au făcut unele eforturi pentru a măsura „forța de coagulare” și să se compare activitatea diferitelor băi de coagulare sau condiții de filare față de soluția de filare.

Coagulare, forță de coagulare, etc. sunt termeni ambigui definiți în tehnologia fibrelor. În chimia coloidală tradițională „coagularea” înseamnă „agregarea particulelor coloidale și tranziția solului liofobic într-un gel”. Procesele moleculare și termodinamice care se desfășoară într-o soluție concentrată de polimer tratată cu un nesolvent („baia de coagulare”) sunt mult diferite. Termenul coagulare este așa de încetățenit încât nu poate fi omis complet din nici o carte de specialitate. Totuși, noi vom încerca să tratăm procesele din baia de coagulare în termenii unor concepte cu un sens mai bine definit. Se utilizează termenul solidificare când sunt considerate aspectele mecanice ale tranziției. Termenii „separarea de fază”, „precipitarea polimerului” sau „gelifierea” sunt utilizați în sens termodinamic și cinetic.

Măsura cea mai directă și teoretic cea mai corectă a forței de coagulare în termeni de solidificare este viteza specifică de creștere a stratului solid, care se formează la suprafața soluției de polimer tratată cu un nesolvent. Observațiile pe polimeri și copolimeri de acrilonitril, clorură de vinil și alcool polivinilic au indicat că solidificarea din baia de coagulare este însoțită de formarea unui strat rigid pe suprafața soluției. Acest strat are o frontieră net separată care se mișcă treptat spre interiorul fibrei. În figura 5.14 este prezentată mișcarea frontierei dintr-o soluție de 26% PAN în dimetil-acetamidă tratată cu soluții apoase de dimetilacetamidă. Se poate observa că la începutul procesului, grosimea stratului solidificat  $\xi$  este proporțional cu rădăcina pătrată a timpului. Viteza de deplasare a frontierei se reduce când se mărește concentrația solventului din baia de coagulare (și



deci se reduce fluxul transferului de masă). Viteza specifică a acestui proces se poate reprezenta prin procentul  $\Phi$  definit prin:

$$\Phi = \frac{1}{4} \lim_{t \rightarrow 0} (d\xi/dt) \quad (5.99)$$

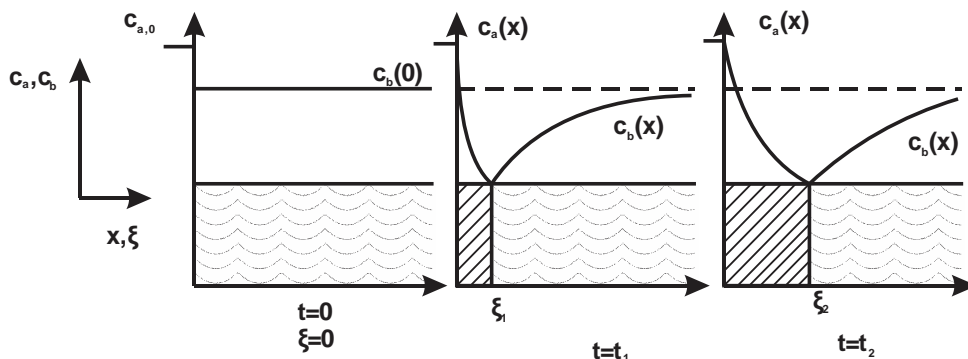


Figura 5.14. Distribuția fazelor în difuzia cu frontieră mobilă

Teoria difuziei cu frontieră mobilă face posibilă determinarea coeficienților de difuzie din stratul solidificat și a timpului necesar pentru ca stratul crescător să atingă centrul filamentului.

#### 5.5.5.4. Teoria difuziei cu frontieră mobilă

Difuzia joacă un rol foarte important în filarea umedă ca un factor determinant pentru multe procese cinetice (tranziția de fază, reacțiile chimice, etc.). Când viteza proceselor din filament sunt infinit mai mari comparativ cu viteza difuziei se formează o frontieră distinctă între părțile reacționate și nereacționate. Procesele care pot fi descrise cu acest model implică, printre altele, neutralizarea liniei de filare într-o baie acidă și solidificarea cu strat crescător.

Teoria difuziei cu frontieră mobilă a fost dezvoltată de mai mulți autori.

Să analizăm problema mai simplă a unui sistem semiinfinit care conține componentul  $b$  în care difuzează un alt component  $k$  din afară și care reacționează instantaneu cu  $b$ , ca în figura 5.14, unde se prezintă variația concentrației la diferiți timpi.

Se presupune că difuzia este unidimensională, cu coeficientul de difuzie  $D_a$  (componentul „a” în stratul reacționat) și  $D_b$  (componentul „b” în stratul nereacționat). Viteza transferului de masă este descrisă de legea lui Fick:

$$\text{Stratul reacționat } (0 < x < \xi): \partial c_a / \partial t = D_a (\partial^2 c_a / \partial x^2)$$

$$c_a = \begin{cases} c_{a,0} & \text{pentru } x = 0, t \geq 0 \\ 0 & \text{pentru } x > 0, t = 0 \\ 0 & \text{pentru } x = \xi, t > 0 \end{cases} \quad (5.100)$$

$$\text{Stratul nereacționat } (\xi < x < \infty): \partial c_b / \partial t = D_b (\partial^2 c_b / \partial x^2)$$

$$c_b = \begin{cases} c_{b,0} & \text{pentru } x = \infty, t \geq 0 \\ c_{b,0} & \text{pentru } x > 0, t = 0 \\ 0 & \text{pentru } x = \xi, t > 0 \end{cases} \quad (5.101)$$

Soluția ecuațiilor de mai sus, cu condiția suplimentară de continuitate a transferului de masă prin frontiera mobilă:

$$x = \xi, \quad -D_a (\partial c_a / \partial x) = D_b (\partial c_b / \partial x) \quad (5.102)$$

conduce la expresia pentru poziția frontierei mobile:

$$(c_{a,0}/c_{b,0})(D_a/D_b)^{1/2} = \frac{\exp(\Phi/D_a) \operatorname{erf} \left[ (\Phi/D_a)^{1/2} \right]}{\exp(\Phi/D_b) \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[ (\Phi/D_b)^{1/2} \right] \right\}} \quad (5.103)$$

unde:  $\Phi = \xi^2/4t = \text{const.}$  (5.104)

iar  $\operatorname{erf}(\ )$  este funcția erorilor.

După cum se vede din ecuația (5.103), parametrul  $\Phi$  este independent de timp și este determinat de raportul concentrațiilor inițiale și coeficienții de difuzie.

Când difuzivitatea substanței „b” este neglijabilă, concentrația acesteia este practic constantă:

$$D_b = 0 \Rightarrow c_b = \begin{cases} c_{b,0}, & \text{la } x > \xi \\ 0 & \text{la } x \leq \xi \end{cases} \quad (5.105)$$

și ecuația (5.103) se reduce la:

$$(c_{a,0}/c_{b,0}) = (\pi \Phi/D_a)^{1/2} \exp(\Phi/D_a) \operatorname{erf} \left[ (\Phi/D_a)^{1/2} \right] \quad (5.106)$$

Pe de altă parte, când coeficienții de difuzie sunt identici ( $D_a=D_b=D$ ), ecuația (5.103) se reduce la:

$$c_{a,0}/c_{b,0} = \operatorname{erf} \left[ (\Phi/D)^{1/2} \right] \quad (5.107)$$

Cu ajutorul ecuațiilor (5.103) – (5.107) se pot calcula coeficienții de difuzie  $D_a$  și  $D_b$  din valorile observate  $\Phi$  și concentrațiile inițiale  $c_{a,0}$  și  $c_{b,0}$ . Soluțiile grafice ale ecuațiilor (5.106) și (5.107) sunt prezentate de Hermans<sup>14</sup>.

În mod similar se pune problema pentru cazul cilindric, care este mult mai apropiat de filarea filamentelor. Două trăsături generale diferențiază cazul cilindric de cel liniar:

- a) grosimea stratului de suprafață nu este proporțional cu rădăcina pătrată a timpului;

- b) există un timp finit necesar ca frontiera mobilă să atingă axa filamentului. Acest timp este proporțional cu rădăcina pătrată a razei cilindrului  $R$  și depinde de constantele de difuzie și concentrațiile inițiale ale ambilor componenți.

Soluții speciale ale difuziei cilindrice sunt:

- a)  $D_a = D_b = D$   
 b)  $D_a \neq 0, D_b = 0$  (mobilitatea lui  $b$  neglijabilă)

Prin analogie cu teoria difuziei aplicată la două specii reactante se poate modela procesul de formare din soluție în baia de coagulare. Se poate considera că procesul de coagulare este instantaneu, odată ce s-au realizat condițiile acestuia.

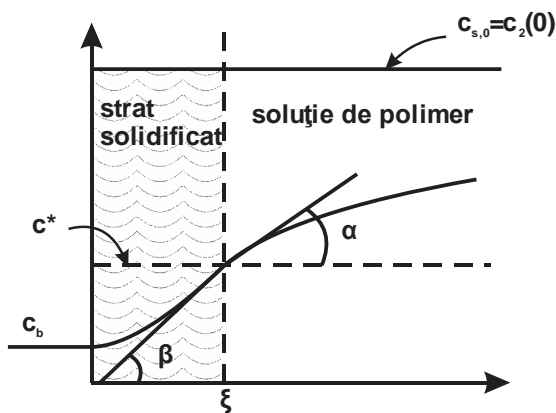


Figura 5.15. Distribuția concentrației în filarea din soluție

Transferul de masă este guvernat de ecuațiile cu derivate parțiale:

$$\begin{cases} \frac{\partial c_1}{\partial t} = D_I \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2}, & 0 < x < \xi \\ \frac{\partial c_2}{\partial t} = D_{II} \frac{\partial^2 c_2}{\partial x^2}, & \xi < x < L \end{cases} \quad (5.108)$$

cu următoarele condiții la limită și inițiere:

$$\begin{aligned}
 t = 0, c_2 &= c_{s,0} \text{ (concentrația solventului în soluția de filat)} \\
 x = 0, c_1 &= c_B \text{ (concentrația solventului în baia de coagulare)} \\
 x = \xi, c_1 = c_2 &= c^* \text{ (concentrația critică)} \\
 x = \xi, D_I \left( \frac{\partial c_1}{\partial x} \right)_{x=\xi} &= D_{II} \left( \frac{\partial c_2}{\partial x} \right)_{x=\xi} \text{ (continuitatea transportului)}
 \end{aligned} \tag{5.109}$$

Soluția ecuațiilor de mai sus se caută sub forma:

$$\begin{cases} c_1 = a_1 + a_2 \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4D_I t}} \right) \\ c_2 = b_1 + b_2 \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4D_{II} t}} \right) \end{cases} \tag{5.110}$$

La interfața de formare avem:

$$c_1 = c_2 = c(\xi, t) = \text{constant}$$

și deci:

$$dc = 0 = \frac{\partial c}{\partial \xi} d\xi + \frac{\partial c}{\partial t} dt \tag{5.111}$$

de unde se obține:

$$\frac{d\xi}{dt} = - \frac{\partial c / \partial t}{\partial c / \partial \xi} \tag{5.112}$$

Derivând (5.110) în raport cu  $\xi$  și  $t$  și înlocuind în (5.112) se obține:

$$\xi = \sqrt{4\alpha t} \tag{5.113}$$

Constantele  $a_1, a_2, b_1, b_2$  și  $\alpha$  se determină din condițiile la limită formulate mai sus. Astfel:

$$c_B = a_1 + a_2 \operatorname{erf}(0) = a_1 \Rightarrow a_1 = c_B \tag{5.114a}$$

$$c_{s,0} = b_1 + b_2 \operatorname{erf}(\infty) \Rightarrow b_1 + b_2 = c_{s,0}$$

$$a_1 + a_2 \operatorname{erf} \frac{\xi}{\sqrt{4D_I t}} = c^*$$

$$b_1 + b_2 \operatorname{erf} \frac{\xi}{\sqrt{4D_{II}t}} = c^*$$

$$c^* = a_1 + a_2 \operatorname{erf} \frac{\sqrt{4\alpha t}}{\sqrt{4D_I t}} = a_1 + a_2 \operatorname{erf} \sqrt{\frac{2}{D_I}}$$

$$c^* = c_B + a_2 \operatorname{erf} \sqrt{\frac{2}{D_I}} \Rightarrow a_2 = \frac{c^* - c_B}{\operatorname{erf} \sqrt{\frac{\alpha}{D_I}}} \quad (5.114b)$$

$$c^* = b_1 + b_2 \operatorname{erf} \sqrt{\frac{\alpha}{D_{II}}}$$

$$b_1 = c_{s,0} - b_2$$

$$c^* = c_{s,0} - b_2 + b_2 \operatorname{erf} \sqrt{\frac{\alpha}{D_{II}}}$$

$$c^* - c_{s,0} = b_2 \left( \operatorname{erf} \sqrt{\frac{\alpha}{D_{II}}} - 1 \right) \Rightarrow$$

$$b_2 = \frac{c^* - c_{s,0}}{\left( \operatorname{erf} \sqrt{\frac{\alpha}{D_{II}}} - 1 \right)} \quad (5.114c)$$

$$b_1 = c_{s,0} - \frac{c^* - c_{s,0}}{\operatorname{erf} \left( \sqrt{\frac{\alpha}{D_{II}}} - 1 \right)}$$

$$b_1 = \frac{c_{s,0} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{\alpha}{D_{II}}} - c_{s,0} - c^* + c_{s,0}}{\operatorname{erf} \sqrt{\frac{\alpha}{D_{II}}} - 1}$$

$$b_1 = \frac{c_{s0} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{\alpha}{D_{II}}} - c^*}{\operatorname{erf} \sqrt{\frac{\alpha}{D_{II}}} - 1} \quad (5.114d)$$

Constanta  $\alpha$  se determină din condiția continuității transferului la frontiera mobilă, obținându-se ecuația:

$$\frac{c^* - c_{s0}}{c^* - c_B} \cdot \frac{\operatorname{erf} \sqrt{\frac{\alpha}{D_I}}}{\operatorname{erf} \sqrt{\frac{\alpha}{D_{II}}} - 1} \cdot \exp\left(\frac{\alpha}{D_I} - \frac{\alpha}{D_{II}}\right) - \sqrt{\frac{D_I}{D_{II}}} = 0 \quad (5.115)$$

Ultima ecuație se poate rezolva numai pe cale numerică, după care se determină constantele  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  cu ajutorul cărora se determină curbele de variație a concentrațiilor în spațiul de formare. Ecuația (5.115) permite să se studieze influența concentrației băii de coagulare asupra vitezei de formare sau coagulare. De asemenea, se poate studia și influența coeficienților de difuzie  $D_I$  și  $D_{II}$ .

## 5.6. Elemente de construcție a mașinilor de filat

### 5.6.1. Mașini de filat din topitură cu grilă de topire

Partea deosebită a unei astfel de mașini este ansamblul grilei de topire, care este prezentă în figura 5.16.

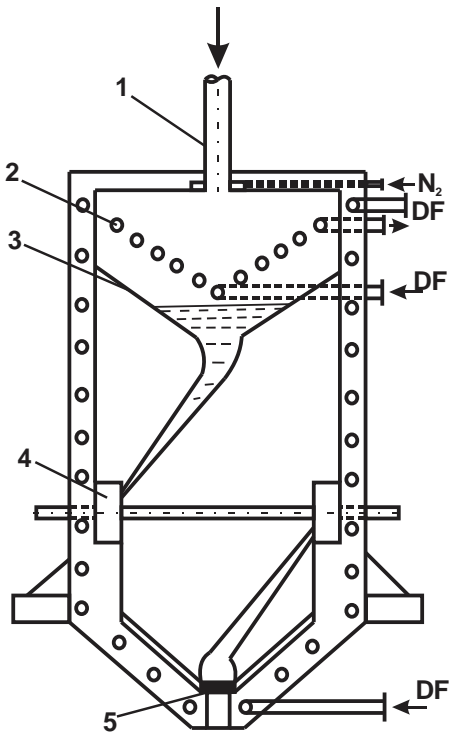


Figura 5.16. Schema de principiu a unei instalații de filare din topitură cu grilă de topire

Granulele de polimer sunt alimentate prin tubul de alimentare (1), eventual sub curent de azot, pe grila de topire prin care circulă un agent termic (difil, spre exemplu). Topitura rezultată se colectează în camera de colectare (3) unde se menține la nivel constant și de unde topitura este aspirată de pompa (4) care refulează într-o a doua pompă, care la rândul ei refulează topitura dozată în blocul de filare (5). Filamentele rezultate cad în tubul de uscare sau formare care este atașat sub ansamblul grilei de topire.



### 5.6.2. Mașină de filat din topitură cu extruder

Mașinile de filat cu extruder se folosesc pentru filarea policondensatelor (PET, P<sub>ε</sub>C, etc.), rolul extruderului fiind de a transforma granulele de polimer într-o topitură omogenă cu presiune constantă controlată. De la extruder, topitura este alimentată într-o grindă de filare, în care sunt montate mai multe blocuri de filare, formate din una sau mai multe filiere. Topitura este distribuită la fiecare loc de filat sau post cu ajutorul unui sistem de distribuție, montat de asemenea în grinda de filare, format dintr-un sistem de conducte, astfel proiectat încât să se alimenteze la fiecare post cantitatea dozată de polimer la aceeași presiune pentru a asigura uniformitatea produsului pe mai multe posturi.

Schema aproximativă a unei secțiuni prin grinda de filare este prezentată în figura 5.17.

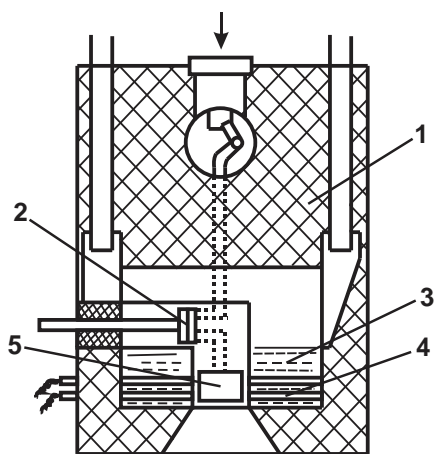


Figura 5.17. Secțiune prin grinda de filare: 1 – izolație; 2 – pompă de dozare; 3 – baie de agent de încălzire; 4 – rezistențe electrice; 5 – montura filierei.

În figura 5.18 se prezintă secțiunea printr-o montură asamblată, în care se pun în evidență mai ales elementele de filtrare a topiturii.

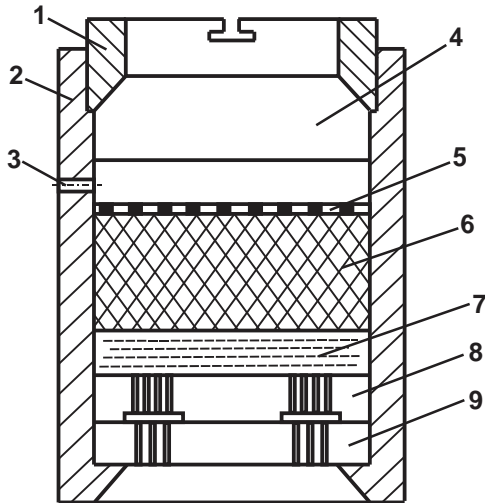


Figura 5.18. Secțiune prin montura filierei: 1 – inel de strângere; 2 – corpul monturii; 3 – intrarea topiturii; 4 – placă de presiune; 5 – placă de distribuție; 6 – filtru; 7 – site; 8 – placă suport; 9 – filiera.

Placa de distribuție (5) are rolul să distribuie uniform topitura pe stratul următor de material filtrant care trebuie să îndeplinească anumite condiții ca: granulometrie bine determinată, reactivitate chimică nulă, rezistență termică, etc.. Pachetul de site care urmează după filtru are rolul de asemenea de a realiza o filtrare și o uniformizare a curgerii înaintea filierei. Sitele sunt confecționate din materiale inoxidabile.

În figura următoare este prezentată o secțiune prin sistemul de formare la o mașină de filat din topitură cu extruder.

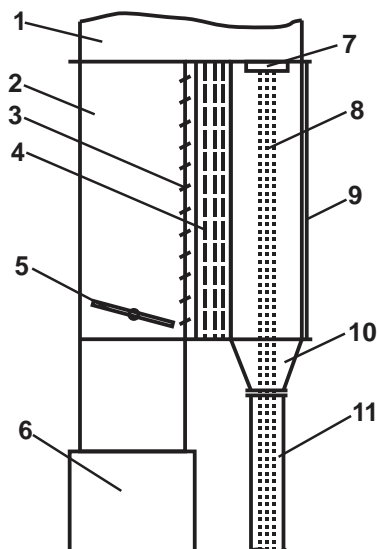


Figura 5.19. Sistemul de formare sau camera de răcire la o mașină de filat din topitură cu grindă de filare:

1 – grindă de filare; 2 – camera de omogenizare a curentului de aer;  
 3 – regulator cu șicane; 4 – site de distribuție; 5 – clapetă pentru reglarea debitului; 6 – magistrală de aer condiționat; 7 – filieră;  
 8 – filamente; 9 – ușa perforată sau sită spre spațiul operatorului;  
 10 – tub de legătură; 11 – tub de cădere sau răcire.

Întreg sistemul de formare prezentat mai sus este alimentat cu agentul de formare (aer condiționat) de la o stație centrală de condiționare unde se reglează temperatura și umiditatea relativă. Pe magistrala (6) se alimentează mai multe blocuri de filare, de la care se distribuie aerul condiționat după care se reglează debitul și curgerea. Curentul de aer care curge spre filamente, de regulă perpendicular, trebuie să aibă caracterul cât mai apropiat de curgerea cu deplasare totală. Regulatorul cu șicane și sitele au tocmai acest rol de a realiza curgerea cât mai apropiată de deplasarea totală. Sunt excluse turbioanele în curentul de aer care ar putea să deranjeze procesul ducând chiar la ruperea filamentelor la ieșirea din filieră.

### 5.6.3. Pompele de dozare

Soluția sau topitura de polimer trimisă la filieră trebuie să fie dozată cu mare precizie pentru a asigura uniformitatea filamentelor. Pentru aceasta se folosesc pompe cu roți dințate sau pompe de dozare. O astfel de pompă este constituită din trei plăcuțe, cea din mijloc fiind prevăzută cu două locașe în care sunt montate cele două roți dințate (figura 5.20).

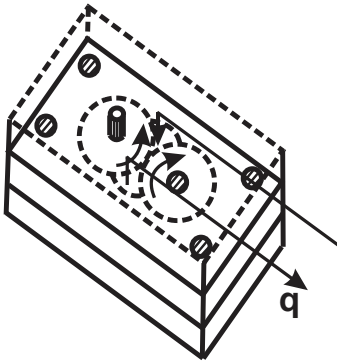


Figura 5.20. Schema de construcție a unei pompe de dozare

Pompetele de dozare trebuie să lucreze la debit constant în timp, motiv pentru care ele sunt constituite din materiale rezistente la coroziune și eroziune, cum sunt oțelurile aliate cu 0,85% V, 0,8% Mo, 0,35% Si, 0,2% Mn, 0,4% Co, 12% Cu, 1,55% C și 83,85% Fe.

Debitul pompetei se exprimă de regulă în  $\text{cm}^3/\text{rot}$  și se calculează cu relația:

$$q = 2z \cdot f \cdot b \langle \text{cm}^3/\text{rot} \rangle \quad (5.116)$$

în care:

$z$  – numărul de dinți la o roată dințată;

$f$  – secțiunea unui dinte,  $\text{cm}^2$ ;

$b$  – lățimea dintelui sau grosimea plăcii mediane, cm;

#### 5.6.4. Filiere

Filierele pot fi clasificate după forma corpului sau profilul orificiului. Astfel avem filiere dreptunghiulare, circulare, semicirculare, etc.. După formarea secțiunii unui canal avem:

- a) cu orificiu cilindric;
- b) cu orificii profilate;
- c) cu orificii pentru profile lipite.

În figura 5.21 se dau unele secțiuni prin orificiile fibrelor din categoria *b* și *c*, împreună cu profilul filamentelor obținute.

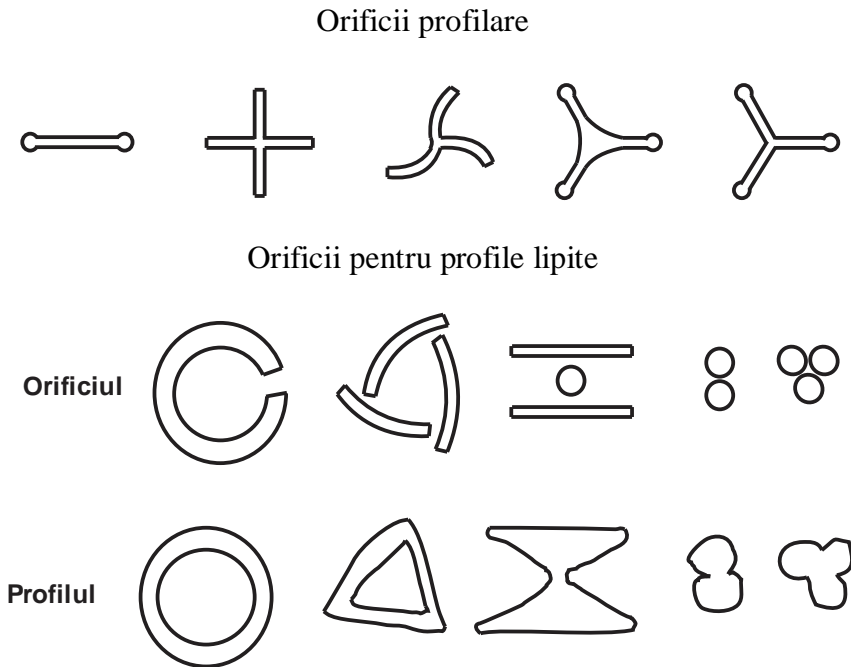


Figura 5.21. Secțiune prin canalele filierei

Secțiunea longitudinală este prezentată în figura 5.22, unde este pusă în evidență variația presiunii pe traseul canalului și dimensiunile filierei.

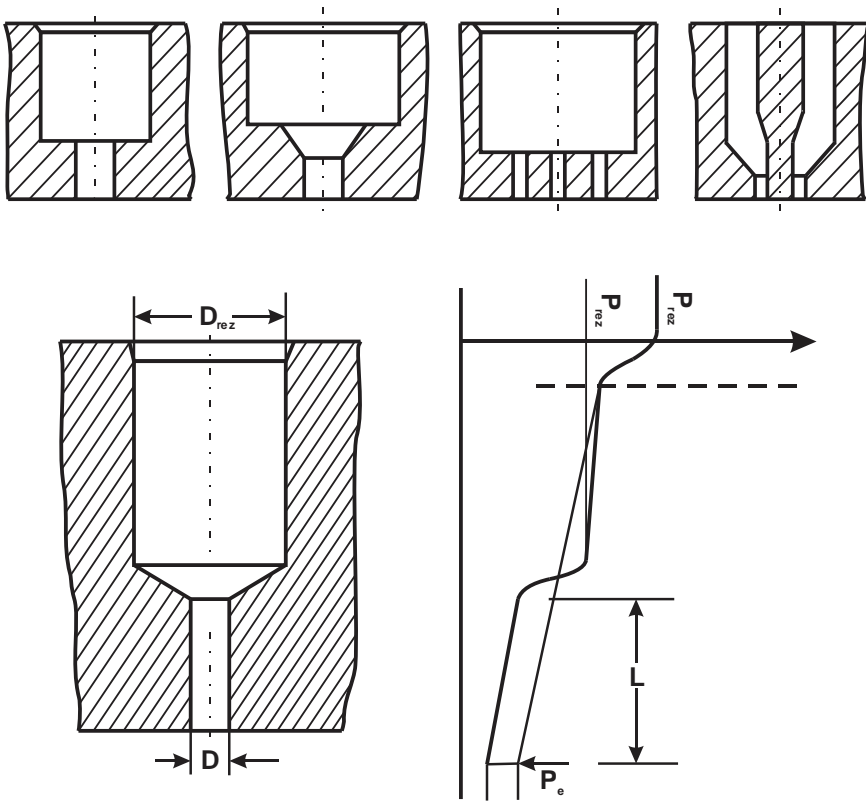


Figura 5.22. Secțiune prin canalul filierei și variația presiunii

## Bibliografie

Lungu, Maria; Petrovan, Simion *Utilaje pentru prelucrarea polimerilor*, Institutul Politehnic Iași, 1980

Tudose, Radu Z. *Procese și utilaje în industria de prelucrare a compușilor macromoleculari*, Editura Tehnică, București, 1976

Feldman, D.; Rusu, M. *Tehnologia prelucrării polimerilor. Prelucrarea materialelor plastice*, Institutul Politehnic Iași, 1977

Renert, M. *Calculul și construcția utilajului chimic*, vol. II, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1971

Volintiru, T.; Ivan, Gh. *Bazele tehnologice ale prelucrării elastomerilor*, Editura Tehnică, București, 1974

Manovicu, I. *Utilaje pentru prelucrarea compușilor macromoleculari*, Institutul Politehnic Timișoara, 1974

Mihail, R.; Goldenberg, N. *Prelucrarea materialelor plastice*, Editura Tehnică, București, 1963

Iordache, Gheorghe; Iatan, I. Radu; Ene, Gheorghe; Păunescu, Mihaela; Voicu, Ion, „Utilaje pentru industria chimică și petrochimică”, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982

S. Petrovan, M. Lungu (1989), *Îndrumar pentru elaborarea proiectelor la disciplina Ingineria reacțiilor chimice și utilaje specifice*, Rotaprint, I.P.Iași.

J. R. Wagner Jr., E. M. Mount III, H. F. Giles Jr. (2013), *Extrusion: the definitive processing guide and handbook*, Second Edition, William Andrew – Elsevier, eBook ISBN: 9781437734829

J.F. Agassant, P. Avenas, J.-Ph. Sergent (1986), *La mise en forme des matiers plastiques*, II-eme ed., Tech &Doc., Lavoisier, Paris.

E. Tempelman, H. Shercliff, B. Ninaber van Eyben (2014), *Manufacturing and Design. Understanding the Principles of How Things Are Made*, First Edition, Butterworth Heinemann Elsevier Limited, Oxford

R.C. Progelhof, J.L.Thorne (1993), *Polymer Engineering Principles, Properties, Processes and Tests for Design*, Hanser Publ. Munich, Vienna, NY., Barcelona.

F. Hensen, W. Knappe, H. Potente (1988), *Plastic Extrusion Technology*, Hanser Publ., Munich, Vienna, New York.