

Introducere

Un *proces tehnologic* presupune executarea unor *operatii* care se pot desfasura *succesiv, paralel* sau *ciclic*.

Operatia este o faza distincta a unui proces tehnologic.

Operatiile din tehnologiile de prelucrare chimica a produselor naturale sau sintetice se bazeaza pe fenomene fizice sau chimice denumite *processe fundamentale*.

In functie de procesul fundamental operatiile se clasifica in *operatii fizice* si in *operatii chimice*.

Intr-un proces tehnologic majoritatea operatiilor sunt operatii fizice dar multe dintre operatii pot fi comune unor tehnologii foarte diferite intre ele. De exemplu operatia de *uscarea* este intalnita in tehnologiile din textile, din pielarie, din industria materialelor de constructii, din industria chimica si din alte industrii. Aceste operatii, comune mai multor tehnologii, se numesc *operatii unitare sau operatii tip* si se efectueaza in *utilaje specifice*.

Obiectul acestui curs este studiul *proceselor fizice fundamentale*, al principalelor *operatii fizice unitare* si al *utilajelor lor specifice*.

Procesele fizice fundamentale si principalele operatii unitare sunt prezentate in tabelul 1.

Tabelul 1- procese fizice fundamentale si operatii unitare.

Procesul fizic fundamental	Operatiile fizice unitare		
Transferul de impuls	Operatii hidrodinamice	Transportul fluidelor	
		Comprimarea gazelor	
		Separarea sistemelor eterogene gazoase	Sedimentarea
			Filtrarea
			Spalarea
		Separarea sistemelor eterogene lichide	Decantarea
			Filtrarea
			Centrifugarea
		Amestecarea	

Tabelul 1 (continuare)

Procesul fizic fundamental	Operatiile fizice unitare	
Transferul de caldura	Operatii termice	Incalzirea
		Racirea
		Condendarea
		Evaporarea
Transferul de masa	Operatii de difuziune	Uscarea Distilarea si rectificarea Extractia lichid – lichid Extractia lichid – solid Absorbția si desorbția Adsorbția si desorbția Cristalizarea Sublimarea

Aceasta clasificare are drept criteriu *procesul fizic dominant*, deoarece majoritatea operatiilor se bazeaza pe manifestarea simultana a doua sau chiar a trei procese fundamentale. Astfel *operatiile termice si de difuziune* se bazeaza pe transferul simultan de caldura si de impuls, respectiv pe transferul simultan de masa si de impuls, dar sunt si operatii – cum ar fi: *uscarea, rectificarea, cristalizarea* etc. – la care transferul de impuls, caldura si de masa se desfasoara simultan.

I. Similitudinea, analizadimensionalala si modelarea experimentalala

Facand apel la legile generale ale fizicii (*conservarea masei a impulsului si a energiei, la legile echilibrulu termodinamic si la cinetica proceselor*) se stabilesc o serie de relatii intre marimile fizice ale sistemului care sunt ecuatii algebrice sau ecuatii diferentiale cu derivate partiale.

Solutiile acestor ecuatii sunt importante deoarece in multe cazuri conduc la relatii de *dimensionare ale utilajelor specifice*.

Dar in majoritatea situatiilor integrarea analitica sau chiar numerica a ecuatiilor cu derivate partiale nu este posibila,

deoarece complexitatea unor procese ce se desfășoară în utilajele specifice impune *condiții la limită* și *inițiale* foarte complicate. În acest caz stabilirea unor relații între parametrii unui sistem fizic se poate realiza în două moduri:

a) se încearcă o simplificare a sistemului, pornind de la observații directe sau prin analogie cu alte fenomene – se propune un *model fizic* – pentru modelul fizic propus se stabilește legea de dependență dată de o ecuație denumită *model matematic*.

b) prin investigații experimentale la *nivel de laborator* (micropilot), în *instalații pilot* sau *industriale* (prototip) în care experimentările pot fi conduse în trei moduri diferite care corespund la trei obiective diferite:

1) cu intenția de a studia un *caz particular* pentru a găsi rezultatele valabile numai în acel caz;

- 2) cu intentia de a gasi relatii *valabile pe un domeniu restrans* de variatie a parametrilor;
- 3) cu intentia de a deduce *relatii mai generale*, valabile pe domenii mai extinse decat cele pentru care s-au efectuat experimentarile.

Stabilirea unor relatii utilizate pentru proiectarea instalatiilor industriale (a prototipului) se face conducand experimentarile conform obiectivului al treilea.

Pentru a obtine relatii de calcul cu valabilitate generala experimentarile si prelucrarea datelor trebuie efectuate in spiritul *teoriei similitudinii*. *Teoria similitudinii* sau *teoria modelelor* studiaza fenomenele similare, care sunt *fenomenele guvernate de acelesi legi si care admit conditii de univocitate similare*.

Teoria similitudinii permite stabilirea unor grupuri adimensionale de marimi si constante fizice dimensionale denumite *criterii de similitudine*, care se pot utiliza in operatia de transpunere la scara a rezultatelor obtinute pe modelul experimental folosind o tehnica inginereasca denumita *transpunerea la scara* (“*scale-up*”).

I.1. Similitudinea

Doua sisteme fizice *sunt similare* (simile) daca *respecta conditiile de univocitate* si daca in *doua sectiuni corespondente*, *variabilele care definesc procesul* (temperatura, presuine, debit, concentratii etc.) *au aceleasi valori*. Satisfacerea acestor conditii implica dificultati deosebite de realizare a experimentarilor din cauza numarului mare de variabile care intervin in majoritatea proceselor.

Teoria similitudinii ofera avantajul unei simplificari considerabile a conditiilor ca doua sisteme sa fie similare prin substituirea variabilelor sistemului cu *rapoarte adimensionale intre variabilele sistemului*, denumite *criterii de similitudine* (invarianti de similitudine), al caror numar este mult mai mic decat al variabilelor.

Conditia da doua sisteme fizice la scara diferita, in care are loc un anumit proces (*modelul si prototipul*) sa fie simile este ca valorile numerice ale fiecarui *criteriu de similitudine* sa fie egale, in conditii de *univocitate asemenea*.

Numarul si expresiile criteriilor de similitudine depinde de compexitatea fenomenelor ce se desfasoara in cele doua sisteme.

Pentru ca fenomenle intalnite in ingineria chimica sa *fie similare*, trebuie indeplinite urmatoarele conditii de similitudine:

1) *Similitudinea geometrica se exprima prin relatia:*

$$\frac{L_0}{l_0} = \frac{L_1}{l_1} = \frac{L_2}{l_2} = \dots = \frac{L_n}{l_n} = l^0 = \text{const} \dots \dots \dots (1.1)$$

in care: $l_0, l_1, l_2 \dots l_n$ sunt dimensiunile modelului, $L_0, L_1, L_2 \dots L_n$ sunt dimensiunile prototipului, iar l^0 este *raportul de scara*.

2) *Similitudinea constantelor fizice;*

3) *Similitudinea mecanica, realizata prin:*

- *similitudinea statica;*
- *similitudinea cinematica;*
- *similitudinea dinamica.*

4) *Similitudinea termica si de difuzie;*

5) *Similitudinea chimica.*

Relatiile de similitudine se pot generaliza pentru pentru toate sistemele similare rezultand:

$$\begin{aligned}
 \frac{L_1}{L_0} &= \frac{l_1}{l_0} = \frac{l_1'}{l_0'} = \frac{l_1''}{l_0''} = \dots = i_{l,1} \\
 \frac{L_2}{L_0} &= \frac{l_2}{l_0} = \frac{l_2'}{l_0'} = \frac{l_2''}{l_0''} = \dots = i_{l,2} \\
 &\dots\dots\dots \\
 \frac{L_n}{L_0} &= \frac{l_n}{l_0} = \frac{l_n'}{l_0'} = \frac{l_n''}{l_0''} = \dots = i_{l,n}
 \end{aligned}
 \tag{I.2}$$

Rapoartele: $i_{l,1} \ i_{l,2} \ \dots \ i_{l,n}$ se numesc ***invarianti de similitudine***

Conditia de similitudine intre toate sistemele considerate este asigurata de o *valoare constanta* a invariantilor de similitudine.

In cazul in care invariantii de similitudine sunt rapoarte intre doua marimi de aceeași natura, acestia se numesc *simplecsi de similitudine*. Din conditiile de similitudine *termica*, de *difuzie* sau *chimica* rezulta invarianti care sunt rapoarte adimensionale intre grupuri de marimi de natura diferita, denumite *multiplecsi de similitudine* sau *criterii de similitudine*.

Invariantii de similitudine sunt importanti deoarece ecuatiile care descriu fenomene fizice pot fi scrise in forma unor relatii intre criterii de similitudine, denumite *functii sau ecuatii criteriale*.

Similitudinea este totala atunci cand valoarea criteriului in model este egala cu valoarea lui in prototip.

Pentru procese mai complexe nu se poate asigura aceleasi valori in model si prototip datorita incompatibilitatii unor criterii la modificarea scarii (nu este intotdeauna posibila o similitudine totala).

Restrictia aceasta poate fi evitata in unele cazuri. De exemplu o relatie intre criteriile de similitudine de forma generala $f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_n)$ in care $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_n$ sunt criterii de similitudine, poate fi explicitata in raport cu unul dintre criteriile de similitudine:

$$\Pi_1 = \varphi(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_n) \quad (1.3)$$

Daca functia criteriala se exprima printr-o lege de forma:

$$\Pi_1 = a \Pi_2^b \cdot \Pi_3^c \dots \dots \dots \quad (1.4)$$

in care: **a**, **b**, **c**,...sunt constante, exponentii **b,c**,....sunt influentati in mica masura de geometria sistemului, in schimb **a** este un factor de forma care depinde de geometria acastuia. Rezulta ca relatii de forma celei de mai sus pot fi utilizate pentru alte sisteme fizice decat cel folosit (modelul) la determinarea experimentală a exponentilor **b,c**,....si a constantei **a**.

Aceasta metoda de extindere a valabilitatii unei relatii de dependenta intre criteriile de similitudine poarta numele de *extrapolare* si a fost propusa de Nusselt.

Extrapolarea reprezinta un caz mai general decat conditia egalitatii tuturor criteriilor de similitudine, desi mai putin exact, intrucat exponentii **b**, **c**,....., nu sunt riguros constanti.

Deci indiferent de metoda utilizata pentru transpunerea la scara este necesara cunoasterea numarului criteriilor de similitudine si a expresiei fecarui criteriu.

Sunt doua metode de deducere a criteriilor de similitudine si fiecare se bazeaza pe *principiul omogenitatii dimensionale*.

Conform acestui principiu toti termenii unei relatii fizice trebuie sa aiba aceleasi dimensiuni (unitati de masura) intr-un sistem de unitati de masura adoptat.

Relatiile din fizica contin:

- *variabile fizice (lungime, viteza, presiune etc);*
- *constante fizice dimensionale (g, R, etc);*
- *constante adimensionale (3, -5, e, etc)*

Constantele adimensionale nu se iau in considerare indiferent

de metoda utilizata la deducerea criteriilor de similitudine.

I.1.1. Deducerea criteriilor de similitudine din ecuatii differentiale

Metoda este utilizata atunci cand se cunosc ecuatiile differentiale sau algebrice care descriu procesul, dar solutionarea lor analitica nu este posibila. In acest caz ecuatiile differentiale se aduc la *forma dimensionala generalizata*, omitand operatorii de diferentiere si

constante adimensionale, după care se retin termenii independenți. Rapoartele adimensionale obținute între cei n termeni independenți ai ecuației diferențiale generalizate, vor fi cele $(n-1)$ criterii de similitudine ale ecuației criteriale care se va stabili pentru descrierea procesului.

Pentru exemplificare se aplică această metodă la deducere criteriilor de similitudine hidrodinamică. Anticipând cunoștințele de la transferul de impuls, se scrie *componenta x a ecuațiilor diferențiale ale impulsului, pentru curgerea laminară a unui fluid newtonian cunoscută sub numele de ecuațiile Navier-Stokes :*

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} +$$

$$\eta \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \eta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)$$

(1.5)

Marimile fizice din ecuatia de mai sus reprezinta:

- ρ , *densitatea fluidului*

- η , *vascozitatea dinamica a fluidului,*
- v_x, v_y, v_z – *componentele vectorului viteza intr-un sistem cartezian,*
- P , *presiunea statica,*
- g_x , *componenta x a constantei acceleratiei gravitationale,*
- x, y, z , - *coordonate in sistemul cartezian.*

Ecuatia de mai sus se scrie sub forma ecuatiei *dimensionale generalizate*, omitand operatorii de diferentiere si constantele adimensionale:

$$\left[\frac{\rho v}{t} \right] + \left[\frac{\rho v^2}{l} \right] + [\rho g] + \left[\frac{\Delta P}{l} \right] + \left[\frac{\eta v}{l^2} \right] = 0 \quad (1.6)$$

(I)
(II)
(III)
(IV)
(V)

Forma dimensionala a unei derivate de ordinul n este:

$$\frac{\partial^n y}{\partial x^n} = \left[\frac{y}{x^n} \right] \quad (1.7)$$

Daca regimul este stationar, termenii (I) si (II) sunt echivalenti, deoarece:

$$t = \frac{l}{v} \quad \text{si deci:} \quad \frac{\rho v}{t} = \frac{\rho v^2}{l} \quad (1.8)$$

In aceste conditii ecuatia dimensionala generalizata are numai patru termeni independenti din care rezulta trei criterii de similitudine hidrodinamica:

$$\left[\frac{\rho v^2}{l} \right] + [\rho g] + \left[\frac{\Delta P}{l} \right] + \left[\frac{\eta v}{l^2} \right] = 0 \quad (1.9)$$

(I) (II) (III) (IV)

a) **Criteriul Reynolds** se obtine din raportul termenilor (I) si (IV) si reprezinta raportul dintre *fortele de inertie* si *fortele de frecare interna (vascoasa)*:

$$\text{Re} = \frac{\rho v^2}{l} \cdot \frac{l^2}{\eta v} = \frac{\rho v l}{\eta} = \frac{\text{forte de inertie}}{\text{forte viscoase}} = \frac{(I)}{(IV)}$$

b) **Criteriul Froude** se obtine din raportul termenilor (I) si (II) si reprezinta raportul dintre fortele de inertie si cele gravitationale:

$$Fr = \frac{\rho v^2}{l} \cdot \frac{1}{\rho g} = \frac{v^2}{lg} = \frac{\text{forte de inertie}}{\text{forte de gravitatie}} = \frac{(I)}{(II)}$$

c) **Criteriul Euler** se obtine din raportul termenilor (III) si (I) si exprima raportul dintre fortele de presiune statica si cele de inertie:

$$Eu = \frac{\Delta p}{l} \cdot \frac{l}{\rho v^2} = \frac{\Delta P}{\rho v^2} = \frac{\text{forte de presiune}}{\text{forte de inertie}} = \frac{(III)}{(I)}$$

Prin urmare functia criteriala pentru procesele hidrodinamice este:

$$f(\text{Re}, \text{Eu}, \text{Fr})=0 \quad (\text{I.10})$$

Aceasta se explicitizeaza in raport cu criteriul Euler. Utilizand legea de dependenta de *tip Nusselt*, ecuatiile criteriale a curgerii fortate are forma generala:

$$\text{Eu} = k \cdot \text{Re}^{n_1} \cdot \text{Fr}^{n_2} \quad (\text{I.11})$$

Ecuatia de forma celei de mai sus si-a gasit cea mai importanta aplicare in operatia de amestecare pentru calculul puterii agitatoarelor.