

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЗНЕВОДНЕННЯ І ГРАНУЛОУТВОРЕННЯ В АПАРАТІ ПСЕВДОЗРІДЖЕНОГО ШАРУ

Корнієнко Б.Я., Снігур О.В.

### Вступ

Розглядається проведення процесу з отриманням продукту постійного гранулометричного складу без зовнішнього рециклу. Представлені результати статичної оптимізації процесу зневоднення і гранулювання водних розчинів сульфата амонію.

Експериментальні дослідження проведені на лабораторній установці, корпус гранулятора у формі паралелепіпеда 0,11x0,29x1,3 м. Для введення рідкої фази всередині псевдозрідженого шару розташований диспергатор. Завдяки застосуванню газорозподільної решітки у псевдозрідженому шарі створюються циркуляційні потоки.

При аналізі процесу зневоднення і гранулювання у псевдозрідженому шарі з точки зору оптимізації суттєвий вплив на ведення процесу мають енергетичні показники.

Якість гранул визначають багатьма властивостями і вимогами до них. З математичного погляду гранули являють собою систему, що характеризується сукупністю вихідних показників критеріальних властивостей, оптимізація яких доцільна з використанням узагальненого показника якості.

### Постановка задачі

Метою даної статті є пошук зони оптимальних значень змінних технологічного процесу, що впливають на коефіцієнт грануло утворення для процесу псевдозрідження і гранулоутворення в апараті псевдозрідженого шару, побудова математичної моделі процесу, що враховує всі фактори, які впливають на якісний і кількісний показник процесу псевдо зрідження та перевірка адекватності математичної моделі.

В якості критерію оптимальності також можна вибрати максимальний вихід продукту при заданому гранулометричному складі, тобто зменшити пилеунос з апарату. Але на отримання постійного заданого гранулометричного складу суттєво впливає кінетика гранулоутворення у псевдозрідженому шарі. Тому в якості критерію оптимальності обрали максимальний коефіцієнт гранулоутворення.

Коефіцієнт гранулоутворення  $\psi$  є основною характеристикою грануляторів у псевдозрідженому шарі і визначається

$$\psi = \frac{G_{\text{гр}}}{G_{\text{р}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

де  $G_{\text{гр}}$  – продуктивність гранулятора по гранульованому продукту, кг/с ;

$G_{\text{р}}$  – витрати розчину, що подається на диспергацію, кг/с .

Тобто коефіцієнт гранулоутворення показує, яка частина твердої фази з розчину гранулюється, а інша у вигляді пилу виноситься з апарату.

Низький  $\psi$  (менше 90%) може характеризувати процес грануляції, як не економічний із-за втрат енергії і ресурсу устаткування на вловлювання і повторну грануляцію пилу.

На коефіцієнт гранулоутворення впливають режимні параметри процесу (температура в шарі, маса шару і початкова швидкість крапель розчину в диспергаторі та інші фактори).

Аналіз процесу і окремі досліди показали, що збільшення швидкості диспергації, маси псевдозрідженого шару повинні сприяти росту  $\psi$ , а збільшення температури шару, його зменшенню. Науковий інтерес являє взаємовплив при одночасній зміні параметрів, для знаходження оптимальних режимів. Для цього був складений план експерименту на

основі раніше проведених досліджень, де були виявлені інтервали змін параметрів, в яких вірогідність агломерації гранул не висока. Це: температура шару  $T_{ш} = 90 \div 100 \text{ }^\circ\text{C}$ , швидкість диспергації  $U = 3,141 \div 5,655 \text{ м/с}$  і маса шару  $M_{ш} = 6 \div 8 \text{ кг}$ , яка однозначно характеризується перепадом тиску на псевдозрідженому шарі в межах  $\Delta P = 1900 \div 2400 \text{ Па}$ .

Для роботи установки, яка здійснює зневоднення і гранулювання продуктів необхідно підтримувати сталим (максимальним) коефіцієнт гранулоутворення, оскільки він є основним якісним і кількісним показником при виготовленні готової продукції.

Як незалежні змінні, що впливають на роботу установки, взяті узагальнені параметри:

1. перепад тиску (різниця між тиском над і під газорозподільною решіткою);
2. температура шару;
3. швидкість зріджуючого агента.

Як параметр оптимізації був вибраний коефіцієнт гранулоутворення.

Мета експерименту, що проводиться, – пошук оптимальних (найкращих) параметрів установки і режимів її роботи, при яких забезпечується максимальний вихід готової продукції.

Для отримання залежності вибрано модель неповного 2-го порядку

$$y = a_0x_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1x_2 + a_5x_1x_3 + a_6x_2x_3 + a_7x_1x_2x_3.$$

Така структура моделі вибрана у зв'язку з тим, що модель 1-го порядку характеризується суттєвою лінійністю, а модель 2-го порядку потребує різкого збільшення об'єму експериментальних досліджень.

Для побудови залежностей  $\psi = f(\Delta P, T_{ш}, W_r)$  і  $y = f(x_0, x_1, x_2, x_3)$  використовувався повний факторний експеримент типу  $2^3$  [1]. Рівні і інтервали варіювання змінних приведені в табл. 1, а матриця планування і результати експерименту – в табл. 2.

Таблица 1

Незалежні змінні	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	-1	0	+1	
$\Delta P, \text{ Па}$	1900	2150	2400	250
$T_{ш}, \text{ }^\circ\text{C}$	90	95	100	5
$W_r, \text{ м/с}$	3,141	4,398	5,655	1,257

У таблиці прийняті наступні позначення: 0 – основний рівень; +1 – верхній рівень; -1 – нижній рівень.

Таблица 2

№	Планування								Параметри оптимізації					Дисперсія $(\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2$
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	$y_1'$	$y_1''$	$y_1'''$	$\bar{y}_i$	$\hat{y}_i$	
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	81,7	82,1	80,5	81,43	81,87	0,19
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	92,4	89,5	90,2	90,7	90,07	0,4
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	85,1	76,5	84,7	82,1	82,73	0,4
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	70,8	68,2	69,6	69,53	69,1	0,19
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	89,3	80,3	84,7	84,77	84,33	0,19
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	74,7	68,7	77,5	73,63	74,27	0,4
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	75,4	64,0	63,3	67,57	66,93	0,4
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	72,6	73,4	67,4	71,13	71,57	0,19

Експерименти проводили тільки на двох рівнях, рівні чинників є межі досліджуваної області по даному параметру. Точка з координатами  $(u_{01}, u_{02}, \dots, u_{0k})$  є центром плану, або основним рівнем;  $\Delta u_i$  – інтервал варіювання але осі  $u_i$ . Від системи координат  $u_1, u_2, \dots, u_k$  перейдемо до нової безрозмірної системи координат  $x_1, x_2, \dots, x_k$  за допомогою наступного лінійного перетворення:

$$x_i = \frac{u_i - u_{0i}}{\Delta u_i}; i = \overline{0, k} \quad (2)$$

У безрозмірній системі координат верхній рівень відповідає +1, нижній рівень –1, координати центру плану рівні і співпадають з початком координат.

Коефіцієнти рівняння регресії по методу найменших квадратів визначають наступним чином

$$\beta = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b \end{pmatrix} = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (3)$$

Отже, будь-який коефіцієнт рівняння регресії  $b_i$  визначається скалярним добутком стовпця  $y$  на відповідний стовпець  $x_i$  діленим на число дослідів в матриці планування  $N$ :

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ij} y_i. \quad (4)$$

Оскільки коваріаційна матриця  $(X^T X)^{-1}$  для спланованого експерименту діагональна

$$(X^T X)^{-1} = \begin{pmatrix} 1/N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/N & 0 & 0 \\ - & - & - & - \\ - & - & - & - \\ - & - & - & - \\ 0 & 0 & 0 & 1/N \end{pmatrix} \quad (5)$$

то коефіцієнти рівняння регресії не корельовані між собою. Значущість коефіцієнтів рівняння регресії можна перевіряти для кожного коефіцієнта окремо по критерію Стюдента. Діагональні елементи коваріаційної матриці рівні між собою, тому всі коефіцієнти рівняння визначаються з однаковою точністю:

$$S_{b_i} = \frac{1}{\sqrt{N}} S_{\text{восп.}} \quad (6)$$

Для всіх коефіцієнтів рівняння регресії складають співвідношення

$$t_i = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}, \quad (7)$$

яке порівнюють з табличним  $t_{1-q}(f)$  для рівня значущості  $q = 0,05$  і числа ступенів свободи  $f = N(m-1)$ . Якщо  $t_1 < t_{1-q}(f)$ , то приймають гіпотезу рівності нулю генерального коефіцієнта регресії, а відповідний вибірковий коефіцієнт, як незначущий, відсівають з рівняння регресії. При цьому зважаючи на ортогональність матриці планування решту ко-

ефіцієнтів не доводиться перераховувати.

В результаті проведення експерименту і обробки експериментальної інформації з урахуванням формул (4) – (7) отримано наступне рівняння:

$$y = 77,61x_0 - 1,36x_1 - 5,03x_2 - 3,33x_3 - 0,89x_1x_2 - 0,53x_1x_3 + 0,1x_2x_3 + 4,57x_1x_2x_3. \quad (8)$$

$$\text{де } x_1 = \frac{\Delta P - 2150}{250}; x_2 = \frac{T_{\text{ш}} - 95}{5}; x_3 = \frac{W_{\text{г}} - 4,398}{1,257}.$$

Оцінка значущості коефіцієнтів показала, що:

Таблиця 3

№	Коефіцієнти регресійної моделі	Рівень значущості	Коефіцієнт Стьюдента	Значущість
$b_0$	77,61	205,1	1,75	значущий
$b_1$	-1,36	3,59	1,75	значущий
$b_2$	-5,03	13,28	1,75	значущий
$b_3$	-3,33	8,81	1,75	значущий
$b_{12}$	-0,89	2,36	1,75	значущий
$b_{13}$	-0,53	1,41	1,75	не значущий
$b_{23}$	0,1	0,26	1,75	не значущий
$b_{123}$	4,57	12,07	1,75	значущий

коефіцієнти при  $x_1x_3$  і  $x_2x_3$  не значущі. Тому отримуємо математичну модель в наступному вигляді:

$$y = 77,61x_0 - 1,36x_1 - 5,03x_2 - 3,33x_3 - 0,89x_1x_2 + 4,57x_1x_2x_3. \quad (9)$$

Для перевірки адекватності отриманої моделі був використаний критерій Фішера. Значення розрахованого параметра  $F = 1,03$  не перевищує критичного (табличного)  $F_{\text{кр}} = 3,63$ , тобто виконується нерівність  $F \leq F_{\text{кр}}$ , звідси робимо висновок, що отримана математична модель є адекватною процесу, що досліджувався.

З аналізу регресійної моделі видно, що найбільший вплив на вихідний параметр надає параметр  $x_2$ , а найменший –  $x_1$ , так, як коефіцієнт при ньому найменший. Для більш детального вивчення впливу кожної зі змінних  $x_i$  на вихідний параметр  $y_i$  побудуємо залежності  $y_i = f(x_i)$  при фіксованих значеннях інших  $x_{i+1}$  змінних в центрі експерименту (рис. 1). Усі графіки являють собою прямі, що проходять через центр експерименту.

$$\begin{aligned} y &= 77,61 & x_1 = x_2 = x_3 &= 0 \\ y_1 &= 77,61 - 1,36x_1 & x_2 = x_3 &= 0 \\ y_2 &= 77,61 - 5,03x_2 & x_1 = x_3 &= 0 \\ y_3 &= 77,61 - 3,33x_3 & x_1 = x_2 &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Щоб отримати координати екстремуму цільової функції, прирівняли до нуля похідні по факторам і розв'язали отриману систему лінійних рівнянь

$$\begin{cases} -1,36 - 0,89x_2 + 4,57x_2x_3 = 0 \\ -5,03 - 0,89x_1 + 4,57x_2x_3 = 0 \\ -3,33 + 4,57x_2x_3 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

де розв'язок системи:  $x_1 = 1,64$ ,  $x_2 = 0,44$ ,  $x_3 = 0,86$ . Тобто параметри процесу набудуть наступних значень:  $\Delta P = 2560$ , Па;  $T_{\text{ш}} = 97,2$ , °C;  $W_{\text{г}} = 5,48$ , м/с

Отримані координати центра експерименту зсунуті відносно координат в яких проводились досліди. Це свідчить про те, що номінальні значення незалежних змінних вибрані неточно, але основною метою експериментів був пошук області оптимальних значень розглядуваного хіміко-технологічного процесу, яка представлена на рис. 1.

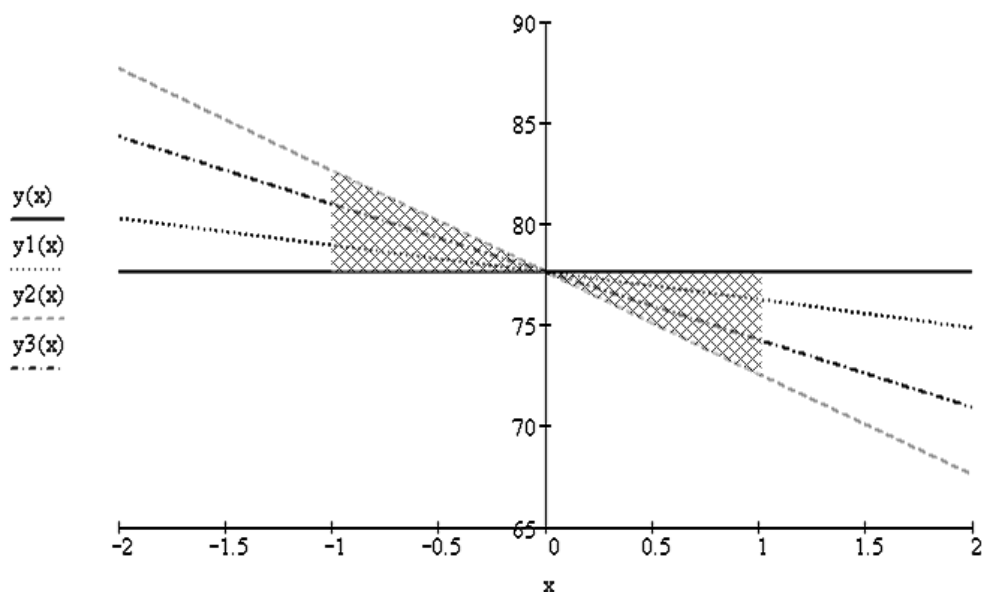


Рис 1 Графіки функції  $y_i = f(x_i)$  для вибору оптимальної зони процесу зневоднення і гранулоутворення

### Висновки

Результати, отримані за допомогою математичної моделі підтверджують технологічні параметри робочого режиму установки.

Такий підхід до розв'язку задачі оптимізації процесу гранулоутворення у псевдо-зрідженому шарі може бути застосований для більшої кількості технологічних параметрів. Для врахування обмеження по гранулометричному складу можна отримати регресійну модель еквівалентного діаметра від технологічних параметрів і розв'язати, як задачу умовної оптимізації.

For process fluidization and granulating in the device with the fluidized bed was carried the search of a zone of optimum values of variable technological process which influence factor granulating, the mathematical model of process is constructed which takes into account all factors, which influence a qualitative and quantitative parameter of process fluidization. The adequacy to mathematical model of process is checked up. By results of accounts are received the zones of optimum values of parameters of chemical-technological process.

1. Планирование эксперимента в технике / В.И. Барабашук, Б.П. Креденцер, В.И. Мирошниченко; Под ред. Б.П. Креденцера. – Техніка, 1984. – 200 с., ил. – (Б-ка инженера). – Библиогр.: с. 196–198.