

УДК 669.162.1:622.785

РЕНГЕВИЧ, Олег Володимирович, доцент, кандидат технічних наук
ОВЧИННИКОВА Ірина Анатоліївна, доцент, кандидат технічних наук
ШУМИКІН Сергій Олександрович, доцент, кандидат технічних наук

РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ Й ОЦІНКА ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗОВНОСТІ САУ ПРОЦЕСОМ ГРУДКУВАННЯ ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ У БАРАБАННИХ ГРУДКУВАЧАХ

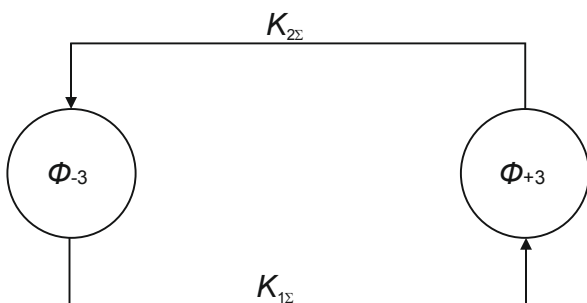
Запорізька державна інженерна академія

Розроблено імітаційну модель процесу грудкування шихтових матеріалів у грудкувачах барабанного типу. Виконано оцінку практичної реалізованості САУ вищезазначеним процесом. Встановлено, що використання розробленої САУ процесом грудкування шихтових матеріалів у барабанних грудкувачах дозволить понизити кількість вороття зазначених матеріалів на 5,2 %.

Ключові слова: шихтові матеріали, процес грудкування, барабанний грудкувач, імітаційна модель, САУ, оцінка її реалізованості

Математична модель процесу грудкування шихтових матеріалів повинна адекватно характеризувати всі його головні особливості та властивості, що проявляються за умов реального функціонування і взаємодії із зовнішнім середовищем. Спроби створення такої моделі [1-5] базувалися на описі руху шихтових матеріалів барабанним грудкувачем, що запропоновано В.І. Коротичем [6]. Проте такий рух залізородних матеріалів є досить складним явищем, математичний опис якого містить багато неоднозначних моментів. Окрім того, у моделі В.І. Коротича є відсутніми у явному вигляді аналітичні співвідношення, які зв'язують вхідні та вихідні параметри процесу, що не дозволяє використовувати її під час імітації системи управління процесом грудкування.

В роботі [7] запропоновано модель процесу грудкування шихтових матеріалів, яка описує перенесення маси між фракціями у процесі грануляції. Згідно моделі (рис. 1) у процесі грудкування активно беруть участь фракції, які можна поділити на дві групи: фракція, що грудкує (-3 мм), та фракція, яку грудкують (+3 мм) [1,8,9].



$K_{1\Sigma}$, $K_{2\Sigma}$ - коефіцієнти швидкості утворення фракції, що грудкує, та фракції, яку грудкують, відповідно
Рисунок 1 – Схема перенесення маси між фракцією, що грудкує, та фракцією, яку грудкують

Стан динамічної рівноваги (стан, коли кількість фракції, що грудкує, і фракції, яку грудкують, залишається постійним, зазвичай настає під час проходження шихтовим матеріалом ділянки грудкувача довжиною 6-7 м) характеризується рівнянням:

$$K_{1\Sigma} \cdot M'_1 = K_{2\Sigma} \cdot M'_2, \quad (1)$$

де M'_1 , M'_2 – кількість фракції, що грудкує, та яку грудкують, в стані динамічної рівноваги відповідно.

Коефіцієнти $K_{1\Sigma}$, $K_{2\Sigma}$ приймають постійними протягом усього періоду грануляції. Тоді можна записати

$$\Delta_{1,cep} = 0,5K_{1\Sigma} \cdot (M_1 - M'_1); \quad (2)$$

$$\Delta_{2,cep} = 0,5K_{2\Sigma} \cdot (M_2 - M'_2); \quad (3)$$

$$\Delta_{1,cep} - \Delta_{2,cep} = \frac{(M_1 - M_2)}{\tau_p}, \quad (4)$$

де M'_1 , M'_2 – початкова кількість фракції, що грудкує та яку грудкують, відповідно; $\Delta_{i,cep}$ – середня швидкість змінювання кількості i -фракції за час грудкування; τ_p – тривалість досягнення процесом грудкування шихтових матеріалів стану динамічної рівноваги.

Вирішуючи рівняння (1) спільно з рівняннями (2)-(4) відносно $K_{1\Sigma}$ і $K_{2\Sigma}$, можна записати

$$K_{1\Sigma} = \frac{2M'_2 \cdot (M_1 - M'_1)}{\tau_p \cdot (M_1 \cdot M'_2 + M'_1 \cdot M_2)}; \quad (5)$$

$$K_{2\Sigma} = K_{1\Sigma} \cdot \frac{M'_1}{M'_2}. \quad (6)$$

Для аналізу перенесення маси під час грудкування у роботі [7] запропоновано поділити шихтовий матеріал за гранулометричним складом на три частини: фракцію (-3 мм), яка груд-

кує, та фракцію, що грудкують, котра містить дві групи часточок розміром 3-10 мм і +10 мм (рис. 2).

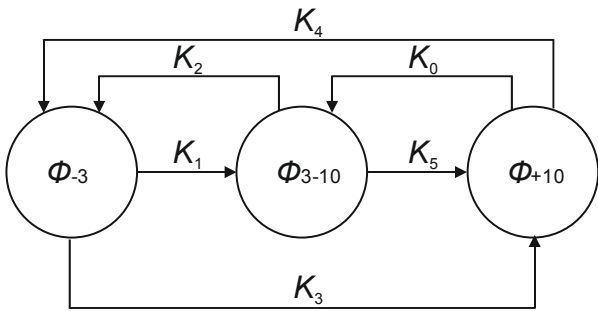


Рисунок 2 – Схема перенесення маси між фракціями шихтових матеріалів під час їх грудкування

Схему перенесення маси за таким розподілом шихтових матеріалів описують наступними аналітичними співвідношеннями:

$$M'_{-3} = M_{-3} - (\Delta_{12} + \Delta_{13} - \Delta_{21} - \Delta_{31}) \cdot \tau_p ; \quad (7)$$

$$M'_{3-10} = M_{3-10} - (\Delta_{21} + \Delta_{23} - \Delta_{12} - \Delta_{32}) \cdot \tau_p ; \quad (8)$$

$$M'_{+10} = M_{+10} - (\Delta_{31} + \Delta_{32} - \Delta_{23} - \Delta_{13}) \cdot \tau_p , \quad (9)$$

де

$$\Delta_{12} = 0,5K_1 \cdot (M_{-3} - M'_{-3}) ;$$

$$\Delta_{21} = 0,5K_2 \cdot (M'_{3-10} - M_{3-10}) ;$$

$$\Delta_{13} = 0,5K_3 \cdot (M_{-3} - M'_{-3}) ;$$

$$\Delta_{31} = 0,5K_4 \cdot (M'_{+10} - M_{+10}) ;$$

$$\Delta_{23} = 0,5K_5 \cdot (M'_{3-10} - M_{3-10}) ;$$

$$\Delta_{32} = 0,5K_6 \cdot (M'_{+10} - M_{+10}) .$$

Величина Δ_{32} є присутньою в системі рівнянь (7)-(9) тільки під час опису перенесення маси у подовженому барабанному грудкувачеві ($L \gg 6$ м). Коефіцієнти визначають таким чином [10]:

$$K_{2\Sigma} = K_2 = K_4 = K_{1\Sigma} \cdot \frac{M'_{-3}}{M'_{3-10} + M'_{+10}} ; \quad (10)$$

$$K_5 = \frac{(2/\tau_p + K_2) \cdot (M'_{+10} - M_{+10})}{M'_{3-10} - M_{3-10}} ; \quad (11)$$

$$K_1 = \frac{(2/\tau_p + K_2 + K_5) \cdot (M'_{3-10} - M_{3-10})}{M_{-3} - M'_{-3}} ; \quad (12)$$

$$K_3 = \frac{(2/\tau_p + K_2) \cdot (M'_{+10} - M_{+10}) - K_5 \cdot (M'_{3-10} - M_{3-10})}{M'_{3-10} - M_{3-10}} ; \quad (13)$$

$$K_6 = \frac{K_5 \cdot M'_{3-10} + K_3 \cdot M'_{-3} - K_4 \cdot M'_{+10}}{M'_{+10}} . \quad (14)$$

Модель процесу грудкування у вигляді системи рівнянь (7)-(9) не розкриває впливу вектора \vec{M} на фракційний склад грудкованої шихти та тим більше не відображає залежність вибраного критерію управління від параметрів процесу, що управляють. Тому для використання в обчислювальних дослідженнях модель (7)-(9) слід суттєво доопрацювати.

За експериментальними даними [3,11], одержаними на барабанному грудкувачеві агломераційної машини № 1 ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» (довжина барабана – 7,50 м, радіус – 1,25 м, швидкість обертання – 9 хв^{-1}) визначають середні значення коефіцієнтів моделі $K_{1\Sigma} = 0,0680$; $K_{2\Sigma} = 0,0640$; $K_1 = 0,0320$; $K_3 = 6 \cdot 10^{-10}$; $K_5 = 0,0094$. Як видно, значення K_3 є дуже малим, і доданок Δ_{13} у системі рівнянь (7)-(9) можна виключити. Також можна виключити і доданок Δ_{32} . Отже, схема перенесення маси між фракціями агломераційної шихти для умов зазначеного підприємства матиме вигляд, що подано на рис. 3.

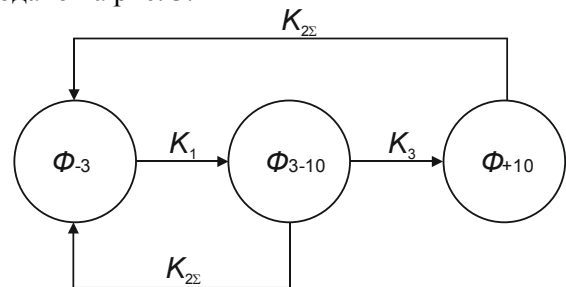


Рисунок 3 – Схема перенесення маси між фракціями агломераційної шихти для умов ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь»

Під час вирішення системи рівнянь (7)-(9) спільно із співвідношеннями для Δ_{12} , Δ_{21} , Δ_{23} і Δ_{31} відносно M'_{-3} , M'_{3-10} і M'_{+10} отримують

$$M'_{-3} = a \cdot b \cdot (M_{+10} - M'_{+10}) + M'_{-3} ; \quad (15)$$

$$M'_{3-10} = a \cdot (M'_{+10} - M_{+10}) + M_{3-10} ; \quad (16)$$

$$M'_{+10} = \frac{M_{+10} \cdot a \cdot (b+c) - c \cdot M_{3-10} + M_{-3}}{a \cdot (b+c)} , \quad (17)$$

$$\text{де } a = \frac{2/\tau_p + K_{2\Sigma}}{K_5} ; \quad b = \frac{2/\tau_p + K_{2\Sigma} + K_5}{K_1} ; \quad c = \frac{K_{2\Sigma}}{K_{1\Sigma}} .$$

Система рівнянь (15)-(17) описує залежність фракційного складу грудкованої шихти тільки від початкового фракційного складу. Проте в

моделі має бути розкритим вплив величини параметрів, що управляють, на значення вибраного критерію управління. Для урахування зазначеного впливу використовували результати експериментів, одержаних на барабанному грудкувачеві агломераційної машини № 1 ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» [3,11,12]. У табл. 1-3 подано дані, що характеризують залежність фракційного складу грудкувальної шихти від вологості, швидкості обертання та кута нахилу грудкувача. За формулами (5) і (6) визначають значення коефіцієнтів моделі $K_{1\Sigma}$ і $K_{2\Sigma}$ (за $\tau_p = 80$ с, $M_1 = 75$ %, $M_2 = 25$ %).

Таблиця 1 – Вплив вологості на фракційний склад шихти та коефіцієнти моделі (за $\alpha = 0^\circ$, $n = 9$ хв⁻¹)

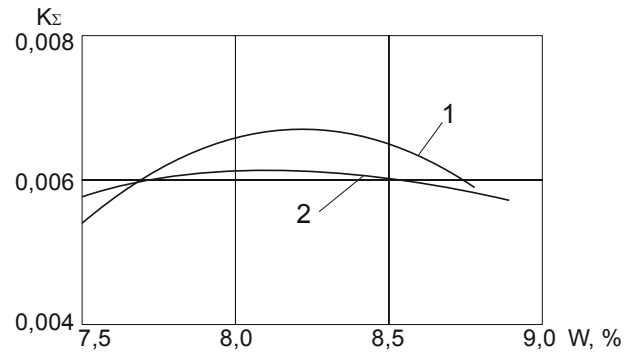
Параметр	Чисельне значення			
	7,5	8,0	8,5	9,0
Вологість, W , %	7,5	8,0	8,5	9,0
Фракція M'_{-3} , %	52,1	47,2	47,3	53,5
Фракція M'_{+3} , %	47,9	52,8	52,7	46,5
Коефіцієнт $K_{1\Sigma}$	0,0054	0,0069	0,0069	0,0050
Коефіцієнт $K_{2\Sigma}$	0,0059	0,0062	0,0062	0,0057

Таблиця 2 – Вплив кута нахилу грудкувача на фракційний склад шихти та коефіцієнти моделі (за $W = 8$ %, $n = 9$ хв⁻¹)

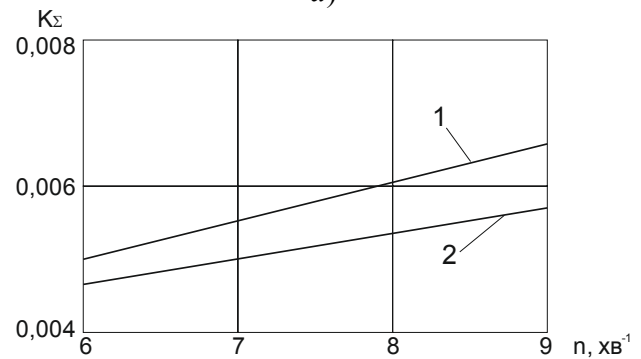
Параметр	Чисельне значення		
	0	1	2
Кут нахилу, α , град	0	1	2
Фракція M'_{-3} , %	47,0	51,8	56,4
Фракція M'_{+3} , %	53,0	48,2	43,6
Коефіцієнт $K_{1\Sigma}$	0,0070	0,0055	0,9941
Коефіцієнт $K_{2\Sigma}$	0,0062	0,0059	0,0053

Таблиця 3 – Вплив швидкості обертання грудкувача на фракційний склад грудкувальної шихти та коефіцієнти моделі (за $W = 8$ %, $\alpha = 0^\circ$)

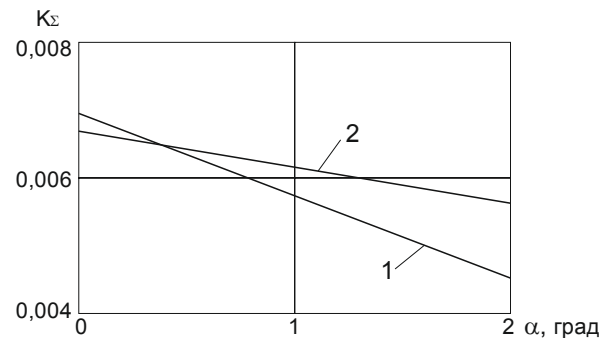
Параметр	Чисельне значення			
	6	7	8	9
Швидкість обертання, n , хв ⁻¹	6	7	8	9
Фракція M'_{-3} , %	53,7	51,4	49,6	47,2
Фракція M'_{+3} , %	46,3	48,6	50,4	52,8
Коефіцієнт $K_{1\Sigma}$	0,0049	0,0056	0,0063	0,0069
Коефіцієнт $K_{2\Sigma}$	0,0057	0,0059	0,0060	0,0062



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Вплив вологості шихтового матеріалу (а), кута нахилу грудкувача (б) та швидкості його обертання (в) на коефіцієнти моделі

Як видно з одержаних результатів (рис. 4), залежності $K_{1\Sigma}$ і $K_{2\Sigma}$ від кута нахилу грудкувача та швидкості його обертання має характер, близький до лінійного, а залежності вказаних коефіцієнтів від вологості W – точку перегину. Тому рівняння залежності коефіцієнтів від дій, що управляють, можна подати у вигляді [15]:

$$K = f(W, \alpha, n) = a_0 + a_1 \cdot \alpha + a_2 \cdot n + a_3 \cdot W + a_4 \cdot W^2 . \quad (18)$$

Значення невідомих параметрів a_1 - a_4 визначають методом найменших квадратів [14] з умови:

$$\Phi = \sum_{j=1}^s (a_0 + a_1 \cdot \alpha + a_2 \cdot n + a_3 \cdot W + a_4 \cdot W^2 - f_j)^2 \Rightarrow \min , \quad (19)$$

де S – кількість елементів вибірки.

Така умова виконується коли:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial a_0} = 2 \sum_{j=1}^S (a_0 + a_1 \cdot \alpha_j + a_2 \cdot n_j + a_3 \cdot W_j + a_4 \cdot W_j^2 - f_j) = 0 ; \quad (20)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial a_1} = 2 \sum_{j=1}^S (a_0 + a_1 \cdot \alpha_j + a_2 \cdot n_j + a_3 \cdot W_j + a_4 \cdot W_j^2 - f_j) \cdot \alpha_j = 0 ; \quad (21)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial a_2} = 2 \sum_{j=1}^S (a_0 + a_1 \cdot \alpha_j + a_2 \cdot n_j + a_3 \cdot W_j + a_4 \cdot W_j^2 - f_j) \cdot n_j = 0 ; \quad (22)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial a_3} = 2 \sum_{j=1}^S (a_0 + a_1 \cdot \alpha_j + a_2 \cdot n_j + a_3 \cdot W_j + a_4 \cdot W_j^2 - f_j) \cdot W_j = 0 ; \quad (23)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial a_4} = 2 \sum_{j=1}^S (a_0 + a_1 \cdot \alpha_j + a_2 \cdot n_j + a_3 \cdot W_j + a_4 \cdot W_j^2 - f_j) \cdot W_j^2 = 0 . \quad (24)$$

Виконуючи відповідні перетворення, отримують систему рівнянь:

$$a_0 \cdot S + a_1 \cdot \sum_{j=1}^S n_j^2 + a_2 \cdot \sum_{j=1}^S n_j^2 + a_3 \cdot \sum_{j=1}^S W_j + a_4 \cdot \sum_{j=1}^S W_j^2 = \sum_{j=1}^S f_j ; \quad (25)$$

$$a_0 \cdot \sum_{j=1}^S \alpha_j + a_1 \cdot \sum_{j=1}^S \alpha_j^2 + a_2 \cdot \sum_{j=1}^S \alpha_j \cdot n_j + a_3 \cdot \sum_{j=1}^S \alpha_j \cdot W_j + a_4 \cdot \sum_{j=1}^S \alpha_j \cdot W_j^2 = \sum_{j=1}^S f_j \cdot \alpha_j ; \quad (26)$$

$$a_0 \cdot \sum_{j=1}^S n_j + a_1 \cdot \sum_{j=1}^S \alpha_j \cdot n_j + a_2 \cdot \sum_{j=1}^S n_j^2 + a_3 \cdot \sum_{j=1}^S n_j \cdot W_j + a_4 \cdot \sum_{j=1}^S n_j \cdot W_j^2 = \sum_{j=1}^S f_j \cdot n_j ; \quad (27)$$

$$a_0 \cdot \sum_{j=1}^S W_j + a_1 \cdot \sum_{j=1}^S \alpha_j \cdot W_j + a_2 \cdot \sum_{j=1}^S W_j \cdot n_j + a_3 \cdot \sum_{j=1}^S \alpha_j \cdot W_j + a_4 \cdot \sum_{j=1}^S \alpha_j \cdot W_j^2 = \sum_{j=1}^S f_j \cdot W_j ; \quad (28)$$

$$a_0 \cdot \sum_{j=1}^S W_j^2 + a_1 \cdot \sum_{j=1}^S \alpha_j \cdot W_j^2 + a_2 \cdot \sum_{j=1}^S W_j^2 \cdot n_j + a_3 \cdot \sum_{j=1}^S \alpha_j \cdot W_j^3 + a_4 \cdot \sum_{j=1}^S \alpha_j \cdot W_j^4 = \sum_{j=1}^S f_j \cdot W_j^2 . \quad (29)$$

Вирішуючи систему рівнянь (25)-(29) відносно $K_{1\Sigma}$ і $K_{2\Sigma}$, мають аналітичні співвідношення:

$$K_{1\Sigma} = -0,1254 - 1,2912 \cdot 10^{-3} \alpha + 5,8196 \cdot 10^{-4} n + 0,0334 W - 2,040 \cdot 10^{-3} W^2 ; \quad (30)$$

$$K_{2\Sigma} = -0,0474 - 5,610 \cdot 10^{-4} \alpha + 1,920 \cdot 10^{-4} n + 0,0127 W - 7,8066 \cdot 10^{-4} W^2 . \quad (31)$$

У табл. 4 подано емпіричні та розрахункові значення коефіцієнтів $K_{1\Sigma}$ і $K_{2\Sigma}$ за різних значень параметрів, що управляють.

Таблиця 4 – Значення коефіцієнтів $K_{1\Sigma}$ і $K_{2\Sigma}$

Кут нахилу, град	Швидкість обертання, хв. ⁻¹	Вологість шихти, %	Значення $K_{1\Sigma}$		Значення $K_{2\Sigma}$	
			емпіричне	розрахункове	емпіричне	розрахункове
0	9	7,5	0,0054	0,0057	0,0059	0,0059
0	9	8,0	0,0069	0,0067	0,0062	0,0063
0	9	8,5	0,0069	0,0066	0,0061	0,0062
0	9	9,0	0,0050	0,0053	0,0057	0,0057
0	6	8,0	0,0049	0,0049	0,0057	0,0057
0	7	8,0	0,0056	0,0055	0,0059	0,0058
0	8	8,0	0,0062	0,0061	0,0060	0,0059
1	9	8,0	0,0055	0,0054	0,0059	0,0057
3	9	8,0	0,0041	0,0041	0,0053	0,0051

Коефіцієнти a_0 - a_4 співвідношень є значущими, якщо виконується умова:

$$|a_i| \geq \Delta a_i = t(0,05; f_u) \cdot \frac{S_y}{S^{0,5}} , \quad (32)$$

$$\text{де } S_y = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^s (K_j^{\text{емп}} - \bar{K}_j)^2}{(m-1) \cdot s}}; \quad f_u = m-1; \quad s - \text{кількість експериментальних даних};$$

m – кількість паралельних дослідів; $t(0,05;f_u)$ – критерій Стьюдента

Підставляючи значення $s = 9$; $m = 3$, $t(0,05;2) = 2,92$ до нерівності (32), мають $\Delta\alpha_i = 4,13 \cdot 10^{-4}$ для коефіцієнта $K_{1\Sigma}$ і $\Delta\alpha_i = 8,14 \cdot 10^{-5}$ – для коефіцієнта $K_{2\Sigma}$. Як видно, всі коефіцієнти $|a_i|$ рівнянь (30) і (31) є більшими за модулем ніж відповідні значення $\Delta\alpha_i$, що вказує на їх значущість.

Адекватність рівнянь (30) і (31) емпіричним даним перевіряли за критерієм Фішера [16]:

$$F = \frac{S_{\text{адк}}^2}{S_y^2} \leq F_p(0,05;f_{\text{адк}};f_u), \quad (33)$$

де $S_{\text{адк}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{K}_i - K_i^{\text{теор}})^2}{s - \ell - 1}$; $f_{\text{адк}} = s - \ell - 1$; ℓ – кількість значущих коефіцієнтів моделі ($\ell = 5$).

Величини F -критеріїв, що визначено розрахунковим шляхом, для коефіцієнтів $K_{1\Sigma}$ і $K_{2\Sigma}$ складають відповідно 3,840 і 3,026 за його табличним значенням, що дорівнює $F_p(0,05;6;2) = 19,163$. Отже, рівняння (26) і (27) є адекватними експериментальним даним.

Підставляючи співвідношення (10) і (11) до рівняння (12) та знаючи що $M'_{-3} + M'_{3-10} + M'_{+10} = 100\%$, отримують співвідношення, яке дозволяє визначити коефіцієнт K_1 :

$$K_1 = \frac{(2/\tau_p + K_{2\Sigma}) \cdot \left(\frac{100K_{1\Sigma}}{K_{1\Sigma} + K_{2\Sigma}} - M_{3-10} - M_{+10} \right)}{M_{-3} - \frac{100K_{2\Sigma}}{K_{1\Sigma} + K_{2\Sigma}}}. \quad (34)$$

Виконуючи підставлення співвідношень (30), (31) і (34) до системи рівнянь (15)-(17) і вважаючи, що $K_5 = 0,0094$, отримують математичну модель процесу грудкування для умов ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь»:

$$M'_{+10} = \frac{M_{+10} \cdot a \cdot (b+c) - c \cdot M_{3-10} + M_{-3}}{a \cdot (b+c)}; \quad (35)$$

$$M'_{3-10} = a \cdot (M'_{+10} - M_{+10}) + M_{3-10}; \quad (36)$$

$$M'_{-3} = a \cdot b \cdot (M_{+10} - M'_{+10}) + M_{-3}, \quad (37)$$

$$K_{1\Sigma} = -0,135 - 1,291 \cdot 10^{-3} \alpha + 5,820 \cdot 10^{-4} n +$$

$$+ 0,033 W - 2,040 \cdot 10^{-3} W^2 \quad (38)$$

$$K_{2\Sigma} = -0,047 - 5,610 \cdot 10^{-4} \alpha + 1,920 \cdot 10^{-4} n + \\ + 0,013 W - 7,807 \cdot 10^{-4} W^2 \quad (39)$$

Коливання гранулометричного складу початкової шихти одержано на агломераційній фабриці ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» [3,12,17]. Очевидно, що випадкові послідовності $M_{3,3}$, M_{3-10} і M_{+10} є нестационарними; це дозволяє прийняти гіпотезу про статистичну незалежність спостережень і відсутність дрейфу.

На барабанних грудкувачах агломераційної фабрики зазначеного підприємства діє система автоматичного контролю та регулювання зволоження шихтових матеріалів [18], яка заснована на фотометричному способі контролю міри грудкування таких матеріалів за змінюванням її вологості. При цьому технологічні параметри роботи грудкувача складають: швидкість обертання – 8 хв.⁻¹; кут нахилу – 2°; середня продуктивність – 153 т/год. [19]. У табл. 5 подано результати змінювання фракції 3-10 мм для цієї САР і результати розрахунків величини M'_{3-10} для САУ процесом грудкування, що реалізовано на методі розпізнавальної оптимізації.

Таблиця 5 – Результати вимірювання й обчислень величини фракції M'_{3-10}

Номер досвіду	M'_{3-10} для діючої САР	M'_{3-10} для розробленої САУ
1	32,1	42,8
2	35,6	43,6
3	35,9	43,5
4	40,2	42,3
5	36,3	43,1
6	37,8	43,7
7	36,0	42,4
8	32,1	43,1
9	29,9	42,9
10	32,0	42,9
11	38,4	43,7
12	32,0	43,4
M'_{3-10}	34,9	43,1
σ	3,04	0,46

Визначають довірчий інтервал для кожної системи – діапазон значень $\bar{M}'_{3-10} \pm \varepsilon$, до якого потрапляє випадкова величина M'_{3-10} з ймовірністю 0,95. Результати розрахунків наведено у табл. 6.

Таблиця 6 – Результати розрахунку довірчого інтервалу

Параметр	Чисельні значення:	
	для діючої САР	для розробленої САУ
Дисперсія випадкової величини	3,04	0,46
Гранична погрішність	2,96	0,45
Довірчий інтервал:		
$\bar{M}'_{3-10} - \varepsilon$	31,94	42,65
$\bar{M}'_{3-10} + \varepsilon$	37,86	43,55

Як впливає з одержаних результатів, діапазон розкиду значень параметра M'_{3-10} для діючої системи регулювання вологості є набагато більшим, ніж для синтезованої системи управління. Окрім того, результати вимірювань кількості фракції -3 мм у грудкованій шихті для діючої САР показали, що середнє значення $M_{-3}^{існ}$ складає 52,8 % [19]. Результати розрахунків на імітаційній моделі процесу грудкування з використанням розробленої САУ зафіксували значення $M_{-3}^{існ} = 47,6 \%$, тобто наявність різниці цих величин вказує на скорочення кількості вороття шихтових матеріалів.

Як відомо [20], точність методу розпізнаваної оптимізації визначається кроком перебирання параметрів, що впливають на процес. При цьому чим меншою є його величина, тим більше адекватно відображається реальна технологічна ситуація у логіко-предикатній моделі об'єкту. У разі використання алгоритму розпізнавальної оптимізації в САУ процесом грудкування точність величини оптимального управління визначатиметься погрішністю приладів, які вимірюють гранулометричний склад шихтових матеріалів, оскільки регулювання інших параметрів (швидкості обертання та кута нахилу барабанного грудкувача) здійснюється дискретно, виходячи з конкретних технологічних умов виробництва та технічних характеристик грудкувача, а погрішність вимірювання сучасних СВЧ-вологомерів є малою [21,22]. Отже, виникає задача пошуку погрішності ΔM вимірювання гранулометричного складу шихтових матеріалів, яке, з одного боку, задовольняє вимогам точності управління процесом грудкування, а, з іншого боку, фізично реалізовується б у вигляді конкретного вимірювального пристрою.

Очевидно, що для вирішення такої задачі потрібним є критерій, за яким можна було б оці-

нювати ефективність розробленої системи управління за різних значень ΔM . Критерій, який використовували під час розробки математичної моделі (34), – кількість кондиційної фракції у грудкованій шихті – є малоефективним через свою не інформативність. Тому доцільно за необхідний критерій вибрати величину дисперсії виду

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^k [(M'_{3-10})_i - M'_{3-10}{}^{max}]^2}{k}, \quad (40)$$

де k – кількість елементів вибірки.

Величину $M'_{3-10}{}^{max}$ можна знайти для математичної моделі (34) за допомогою методу спуску за координатою [24]. Результати розрахунків показали, що для умов барабанного грудкувача агломераційної машини № 1 ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» значення величини $M'_{3-10}{}^{max}$ складає 44,36 % (за параметрів процесу $M_{-3} = 73,88 \%$; $M_{3-10} = 20,28 \%$; $M_{+10} = 5,84 \%$; $W = 8,22 \%$; $n = 9 \text{ хв}^{-1}$; $\alpha = 1^\circ$).

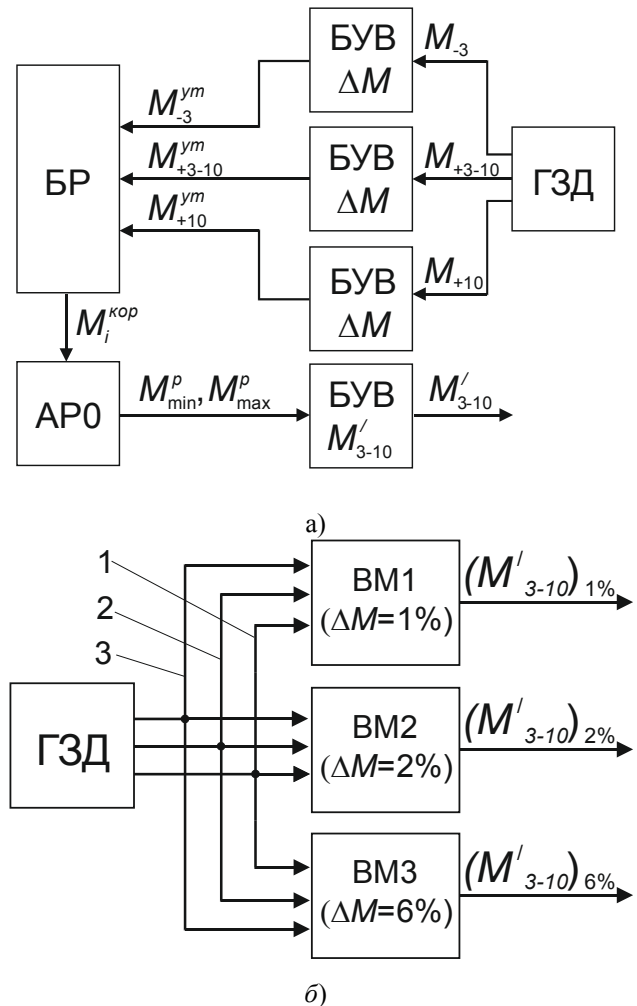


Рисунок 5 – Блок-схема обчислювального модуля (а) та алгоритму оптимізації (б)

Урахування впливу величини ΔM на вибраний критерій S^2 виконували в обчислювальному модулі, реалізованому на ЕОМ, блок-схема якого наведено на рис. 5,а.

Під час його реалізації генератор збурюючих дій (ГЗД) формує поточне значення фракційного складу початкової шихти M_{-3} , M_{3-10} , M_{+10} , кожне з яких поступає до блоку урахування погрішності (БУП) ΔM , де здійснюють вибирання з інтервалу $[M_i - \Delta M; M_i + \Delta M]$ нормально розподіленої випадкової величини з математичним очікуванням M_i і дисперсією $\sigma = \Delta M/3$, значення якої обчислюють за правилом «трьох сигм» [25].

Вибирання значень $M_i^{\text{уточн}}$ виконують за формулою:

$$M_i^{\text{уточн}} = \frac{\Delta M}{3} \cdot [X(0,1) - 0,5] + M_i, \quad (41)$$

де $X(0,1)$ – нормована нормально розподілена випадкова величина.

Далі уточнені значення $M_{-3}^{\text{кор}}$, $M_{3-10}^{\text{кор}}$ і $M_{+10}^{\text{кор}}$ поступають у блок рандомізації (БР), де відбувається їх коригування. Скориговані значення $M_{-3}^{\text{кор}}$, $M_{3-10}^{\text{кор}}$ і $M_{+10}^{\text{кор}}$ направляють безпосередньо (як початкову інформацію) до алгоритму розпізнавальної оптимізації, який видає вектор оптимальних управлінь інтервал $(M'_{3-10})_{\min}^p - (M'_{3-10})_{\max}^p$, $p = \overline{1, m}$, що характеризує p -ий образ, якому відповідає комбінація значень поточних збурень $M_i^{\text{кор}}$ та обчислених оптимальних управлінь. У блоці вибирання значення збурень M'_{3-10} (рис. 5,б) з інтервалу $(M'_{3-10})_{\min}^p - (M'_{3-10})_{\max}^p$ визначають нормально розподілене випадкове число:

$$M'_{3-10} = \frac{\Delta M}{3} \cdot [X(0,1) - 0,5] + M_i + \frac{(M'_{3-10})_{\min}^p - (M'_{3-10})_{\max}^p}{2}. \quad (42)$$

На ЕОМ було виконано 100 дослідів для кожного із шести значень погрішності виміру ΔM : 1, 2, 3, 4, 5 і 6 %. При цьому для забезпечення необхідної точності експерименту використовували схему, що подано на рис. 5,б. Завдяки такій конфігурації значення фракційного складу початкової шихти, одночасно поступає на всі обчислювальні модулі (ОМ), що дозволяє

уникнути можливих статистичних помилок під час виконання експерименту.

У табл. 7 подано результати розрахунків величини середньоквадратичного відхилення S^2 залежно від кроку дискретизації ΔM під час виконання 100 обчислень.

Таблиця 7 – Залежність величини середньоквадратичного відхилення S^2 від погрішності вимірювання гранулометричного складу ΔM

ΔM	1	2	3	4	5	6
S^2	4,24	4,54	5,40	7,56	11,64	18,85

Визначення значення точності, що характеризує достатню якість управління, здійснювали з використанням критерію Фішера. За рівня значущості 0,95 для 100 обчислень величина цього критерію не повинна перевищувати 1,39. Як менше значення середньоквадратичного відхилення вибрали величину S^2 за $\Delta M = 1$ %.

Встановлено, що за $\Delta M = 2$ % значення критерію Фішера становить 1,07 %, за $\Delta M = 3$ % складає 1,27 %, але за $\Delta M = 4$ % – сягає 1,78 %, тобто різко знижується якість управління процесом грудкування. Отже, компромісним значенням величини ΔM , яке, з одного боку, задовольняє вимогам необхідної якості управління процесом грудкування, а, з іншого, характеризує відносну погрішність реального вимірювального приладу [13,25,26] буде величина 3 %.

Висновки

1. Результати виконаних досліджень показали, що коливання фракційного складу початкових шихтових матеріалів є випадковою величиною, розподіленою за нормальним законом. Виявлені статистичні закономірності дозволили синтезувати алгоритмічну модель генерування збурюючих дій.

2. Ефективність управління САУ процесом грудкування шихтових матеріалів, у верхньому рівні якої застосовують метод розпізнавальної оптимізації, залежить від величини погрішності вимірювання гранулометричного складу ΔM , рекомендоване значення якої складає 3,0 %.

3. Встановлено, що використання розробленої дворівневою САУ процесом грудкування шихтових матеріалів дозволяє понизити кількість вороття шихти на 5,2 %.

Бібліографічний список

1. **Коршиков, Г. В.** Влияние степени окомкования шихты и ее физических свойств на показатели процесса спекания [Текст] / Г. В. Коршиков, В. Н. Пономарев, Е. В. Невмержицкий // Сталь. – 1971. – № 11. – С. 969-974.

2. **Ищенко, А. Д.** Статические и динамические свойства агломерационного процесса [Текст] / А. Д. Ищенко. – М. : Metallurgy, 1972. – 320 с.
3. **Гранковский, В. И.** Исследование работы барабанного окомкователя [Текст] / В. И. Гранковский, Ю. М. Зинченко, М. Ю. Пазюк, А. Н. Николаенко // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1979. – № 12. – С. 12-15.
4. **Богдановский, Л. И.** Движение шихты в барабанном окомкователе [Текст] / Л. И. Богдановский, Г. В. Коршиков, И. Н. Галкин // Metallurg. – 1972. – № 6. – С. 8-10.
5. **Готовцев, А. А.** Рациональная загрузка шихты на агломерационную ленту [Текст] / А. А. Готовцев, В. И. Сальников, В. И. Тихонов // Теплотехника и газодинамика агломерационного процесса. – Киев : Наукова думка, 1983. – С. 12-17.
6. **Коротич, В. И.** Теоретические основы окомкования железорудных материалов [Текст] / В. И. Коротич. – М. : Metallurgy, 1966. – 150 с.
7. **Пазюк, М. Ю.** Массоперенос при грануляции железорудных материалов [Текст] / М. Ю. Пазюк // Известия вузов. Черная металлургия. – 1990. – № 4. – С. 8-10
8. **Коротич, В. И.** Металлургия черных металлов [Текст] / В. И. Коротич, А. С. Братчиков ; учебник. – М. : Metallurgy, 1987. – 240 с.
9. **Пузанов, В. П.** Структурно-органические изменения в гранулах при окомковании тонкозернистой агломерационной шихты в барабанах цилиндрического типа [Текст] / В. П. Пузанов, А. В. Малыгина, М. В. Гаврилина // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1983. – № 4. – С. 25-29.
10. **Пазюк, М. Ю.** Контроль гранулометрического состава окомкованной шихты [Текст] / М. Ю. Пазюк, А. Н. Николаенко, В. И. Гранковский, В. М. Насонов // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1981. – № 12. – С. 4-6.
11. **Гранковский, В. И.** Выбор рациональных параметров цилиндрического окомкователя [Текст] / В. И. Гранковский, М. Ю. Пазюк // Известия вузов. Черная металлургия. – 1982. – № 10. – С. 30-33.
12. **Гранковский, В. И.** Управление агломерационным процессом [Текст] / В. И. Гранковский, М. Ю. Пазюк, В. А. Сыромьяский. – Киев : Техника, 1988. – 145 с. – ISBN 5-335-00082-1.
13. **Персиц, В. З.** Измерение и контроль технологических параметров на обогатительных фабриках [Текст] / В. З. Персиц. – М. : Недра, 1982. – 191 с.
14. **Румшинский, Л. З.** Математическая обработка результатов эксперимента [Текст] / Л. З. Румшинский. – М. : Наука, 1971. – 192 с.
15. **Айвазян, С. А.** Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. [Текст] / С. А. Айвазян ; справочное пособие. – М. : Финансы и статистика, 1983. – 471 с.
16. **Микулик Н. А.** Решение технических задач по теории вероятности и математической статистике [Текст] / Н. А. Микулик, Г. Н. Резина ; справочное пособие. – Минск : Вышэйшая школа, 1991. – 164 с.
17. **Гранковский, В. И.** Исследование влияния физических свойств шихты на начальный период окомкования [Текст] / В. И. Гранковский, М. Ю. Пазюк, А. Н. Николаенко, П. А. Половой // Теоретические основы и технология подготовки металлургического сырья к доменной плавке. – Днепропетровск : ДМетИ, 1980. – С. 40-41.
18. **Быткин, В. Н.** Повышение качества агломерата [Текст] / В. Н. Быткин, Б. А. Станишевский, Н. И. Бутенко, В. И. Болгов. – Киев : Проминь, 1973. – 52 с.
19. **Пазюк, М. Ю.** Совершенствование процесса подготовки агломерационной шихты к спеканию в повышенном слое: Дисс. кандидата техн. наук: 05.12.02. – М. : 1982. – 174 с.
20. **Качан, Ю. Г.** Распознающие алгоритмы статистической оптимизации нелинейных объектов [Текст] / Ю. Г. Качан. – Днепропетровск, 1983. – 6 с. – Деп. в УкрНИИТИ. – № 408. – Ук 83Деп.
21. **Бензарь, В. К.** Техника СВЧ-влажнометрии [Текст] / В. К. Бензарь. – Минск : Высшая школа, 1974. – 352 с.
22. **Сыромьяский В. А.** Измеритель влажности агломерационной шихты [Текст] / В. А. Сыромьяский, В. И. Гранковский, М. Ю. Пазюк // Черная металлургия. – 1979. – № 5. – С. 45-46.
23. **Евдокимов, А. Г.** Минимизация функций и ее приложения к задачам автоматизированного управления / [Текст] А. Г. Евдокимов. Сборник задач и упражнений. – Харьков : Выща школа, 1985. – 288 с.
24. **Вентцель, Е. С.** Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 572 с.
25. **Мяздриков, О. А.** Дифференциальные методы гранулометрии [Текст] / О. А. Мяздриков. – М. : Metallurgy, 1974. – 268 с.
26. **Зинченко, Ю. М.** Измерение гранулометрического состава окомкованной шихты СВЧ-прибором [Текст] / Ю. М. Зинченко, М. Ю. Пазюк // Механизация и автоматизация производства. – 1985. – № 6. – С. 28-29.

РЕНГЕВИЧ Олег Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного управления технологическими процессами, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: oren72@mail.ru

ОВЧИННИКОВА Ирина Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного управления технологическими процессами, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: iaov@rambler.ru

ШУМИКИН Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного управления технологическими процессами, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: shusa1958@ukr.net

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ И ОЦЕНКА ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗУЕМОСТИ САУ ПРОЦЕССОМ ОКОМКОВАНИЯ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В БАРАБАННЫХ ОКОМКОВАТЕЛЯХ

Разработана имитационная модель процесса окомкования шихтовых материалов в окомкователях барабанного типа. Выполнена оценка практической реализуемости САУ вышеуказанным процессом. Установлено, что использование разработанной САУ процессом окомкования шихтовых материалов в барабанных окомкователях позволяет снизить количество возврата указанных материалов на 5,2 %. Ключевые слова: шихтовые материалы, процесс окомкования, барабанный окомкователь, имитационная модель, САУ, оценка ее реализуемости

RENDEVICH Oleg, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Automated Control by Flow Processes, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: oren72@mail.ru

OVCHINNYKONA Iryna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Automated Control by Flow Processes, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: iaov@rambler.ru

SHUMYKIN Sergiy, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Automated Control by Flow Processes, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: shusa1958@ukr.net

DEVELOPMENT OF SIMULATION MODEL AND ESTIMATION OF PRACTICAL REALIZABILITY OF SAC BY PELLETIZING PROCESS FOR CHARGE MATERIALS IN DRUM PELLETIZERS

The simulation model of pelletizing process of charge materials in the pelletizers of drum type is worked out. The estimation of practical realizability of SAC by a foregoing process is executed. It is set that the use of worked out SAC in drum pelletizers allows the pelletizing process for charge materials to reduce the quantity of recover of the mentioned materials on 5.2 %.

Keywords: charge materials, pelletizing process, drum pelletizer, simulation model, SAC, estimation of its realizability

Стаття надійшла до редакції 10.09.2017 р.
Рецензент, проф. А.М. Ніколаєнко

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука
<http://www.zgia.zp.ua>