

УДК 661.152.32

Дудка С.В., Подустов М.О., Дзевочко О.М., Рищенко І.М., Кушинський С.І.

**РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ І ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСА ГРАНУЛОУТВОРЕННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ**

**Вступ.** В останні роки проведені комплексні дослідження [1, 2] по розробці технології отримання нового азотно-фосфорного добрива NPS 10:40:5, яке показало високу агрохімічну ефективність. На жаль широкомасштабного випуску такого добрива перешкоджають низька енергоефективність та невисокий рівень екологічної безпеки даного виробництва. З'явилася необхідність у коригуванні технологічних параметрів процесу методом математичного моделювання.

**Мета роботи.** Розробити математичну модель та програмне забезпечення процесу гранулоутворення мінеральних добрив і на їх основі розрахувати технологічні параметри даного процесу гранулоутворення при необхідному гранулометричному складі.

**Викладення основного матеріалу.** Математична модель процесу розроблялася з використанням апарату теорії нечітких множин [3, 4]. Цей метод є одним з найбільш сучасних підходів, що надає можливість приймати рішення в умовах нечіткої та неповної інформації про параметри об'єкта дослідження. Стосовно до процесу гранулоутворення мінеральних добрив ставилося завдання розрахувати технологічні параметри процесу при заданому гранулометричному складі. Розробка математичної моделі проводилася на основі отриманих експериментальних даних на ВАТ "Суміхімпром". Основними параметрами, що впливають на гранулометричний склад є [5]: співвідношення  $P_2O_5/SO_3$ , співвідношення  $CaO/SO_3$ , вологість пульпи ( $W$ , %), температура на виході з барабанного гранулятора-сушарки (БГС) ( $T_{вих}$ , К), розрідження в БГС, ( $P_p$ , кПа), діаметр крапель розпилюємої пульпи, ( $d_k$ , мм). Зв'язок даних параметрів за гранулометричним складом можна отримати через коефіцієнт гранулоутворення, розрахунок якого можна подати у наступному вигляді:

$$\frac{d_e^2}{d_p} = \exp \frac{K \cdot G_n}{3 \cdot (G_p + G_n \cdot (1 - K))}, \tag{1}$$

де  $d_e^2$  – еквівалентний діаметр гранул, мм;  $d_p$  – діаметр ретурна, мм;  $G_n$  – витрата пульпи, кг;  $G_p$  – витрата ретурна, що подається в БГС, кг;  $K$  – коефіцієнт гранулоутворення.

Еквівалентний діаметр гранул на виході БГС представлявся у вигляді залежності:

$$d_e^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{d_i}}, \tag{2}$$

де  $n$  – число фракцій;  $m_i$  – вміст  $i$ -ї фракції, %;  $d_i$  – середній ситовий розмір  $i$ -ї фракції, мм.

В рамках дослідження коефіцієнта гранулоутворення кожен фактор його формування представлявся у вигляді впорядкованої пари: самого фактора, для якого заданий діапазон можливих значень, і функції залежності коефіцієнта гранулоутворення від відповідного фактора. Задаючи систему всіх шести параметрів гранулоутворення у вигляді нечітко заданих величин, пропонується математично формалізувати шукану залежність:

$$A = \left( \begin{array}{l} K(P_p) | a_1 \leq P_p \leq b_1; K(d_k) | a_2 \leq d_k \leq b_2; \\ K(T_{вих}) | a_3 \leq T_{вих} \leq b_3; K\left(\frac{CaO}{SO_3}\right) | a_4 \leq \frac{CaO}{SO_3} \leq b_4; \\ K\left(\frac{P_2O_5}{SO_3}\right) | a_5 \leq \frac{P_2O_5}{SO_3} \leq b_5; K(W) | a_6 \leq W \leq b_6 \end{array} \right), \tag{3}$$

де  $a_i, b_i, i = 1 \div 6$  – мінімальне та максимальне значення факторів формування коефіцієнта гранулоутворення, які визначають граничні значення функції відповідного виду.

Використання теорії нечітких множин для формалізації залежності коефіцієнта гранулоутворення від формуючих його факторів дає можливість отримати наступні переваги:

- оперувати з нечітко заданими вхідними факторами (дані параметри можна уявити у вигляді діапазону можливих значень або таки що постійно змінюються у часі);
- використовувати при проведенні математичної формалізації шуканої залежності нечітко заданих критеріїв оцінки відповідності між основними факторами і коефіцієнтом гранулоутворення;
- проводити оцінку різноманітних можливих значень вхідних даних у допустимому діапазоні їх змін і простежити чутливість коефіцієнта гранулоутворення в залежності від цих варіацій;
- моделювати основні закономірності і взаємозв'язки достатньо складних динамічних систем шляхом їх формалізації на основі використання нечітко заданих величин, що є неможливим за допомогою точних значень вхідних факторів;
- отримати розподіл можливих значень коефіцієнта гранулоутворення в залежності від діапазону можливих значень кожного з факторів формування даного результативного показника, а також провести якісну оцінку як початкових даних, так і отриманих результатів моделювання даного процесу.

В рамках математичної формалізації співвідношень при визначенні коефіцієнта гранулоутворення слід зазначити, що необхідною умовою отримання рівнянь, що описують існуючі взаємозв'язки, виступають статистичні дані. Це пов'язано з тим, що саме експериментальні результати дають можливість говорити про наявність співвідношень між параметрами і змінними моделі.

Розглянемо 35 спостережень, які описують певний діапазон зміни послідовно однієї з вихідних змінних (нечітко задана величина) за одночасної фіксації на одному рівні решти змінних.

На основі отриманих емпіричних даних у вигляді нечітко заданих величин проведемо послідовно розрахунок еквівалентного діаметру гранул NPS добрив на виході з апарату БГС в розрізі 3-х фракцій, а також коефіцієнта гранулоутворення.

Результати розрахунку представлені у табл. 1.

Обробкою експериментальних даних були отримані рівняння залежності певного параметра і значення коефіцієнта гранулоутворення, що на його впливає, одночасно вказані діапазони значень, в межах яких отримані рівняння залишаються справедливими.

Розрідження,  $P_p$

$$\begin{aligned} y_1 &= -16.5K_1 + 16.835 \quad K_1 \in [0.99; 1.01] \quad y_1 \in [0.17; 0.5] \\ y_2 &= K_2 \quad K_2 \in [0.99] \quad y_2 \in [0.5; 0.67] \\ y_3 &= -33.696K_3 + 33.34 \quad K_3 \in [0.98; 0.99] \quad y_3 \in [0.67; 1.0] \\ y_4 &= -0.711K_4 + 1 \quad K_4 \in [0.98; 1.04] \quad y_4 \in [1.0] \\ y_5 &= 27.7K_5 + 27.8 \quad K_5 \in [1.01; 1.04] \quad y_5 \in [0.17; 1.0] \end{aligned}$$

Діаметр крапель,  $d_k$

$$\begin{aligned} y_6 &= 1.2K_6 - 0.8 \quad K_6 \in [0.98; 1.04] \quad y_6 \in [0.37; 0.44] \\ y_7 &= K_7 \quad K_7 \in [0.98] \quad y_7 \in [0.37; 0.44] \\ y_8 &= 14.9K_8 - 14.26 \quad K_8 \in [0.98; 1.01] \quad y_8 \in [0.44; 0.89] \\ y_9 &= 5.5K_9 - 4.7 \quad K_9 \in [1.01; 1.03] \quad y_9 \in [0.89; 1.0] \\ y_{10} &= -56K_{10} + 58.68 \quad K_{10} \in [1.03; 1.04] \quad y_{10} \in [0.44; 1.0] \end{aligned}$$

Температура сушильного агента на виході БГС,  $T_{вих}$

$$\begin{aligned} y_{11} &= -0.3K_{11} + 1.23 \quad K_{11} \in [0.99; 1.02] \quad y_{11} \in [0.89; 0.9] \\ y_{12} &= -1.93K_{12} + 2.88 \quad K_{12} \in [0.98; 0.99] \quad y_{12} \in [0.9; 0.92] \\ y_{13} &= 3K_{13} - 2.02 \quad K_{13} \in [0.98; 1.0] \quad y_{13} \in [0.92; 0.98] \\ y_{14} &= K_{14} - 0.02 \quad K_{14} \in [1.0; 1.02] \quad y_{14} \in [0.98; 1.0] \\ y_{15} &= -4K_{15} + 5.08 \quad K_{15} \in [1.02; 1.04] \quad y_{15} \in [0.92; 1.0] \\ y_{16} &= 1.5K_{16} - 0.64 \quad K_{16} \in [1.02; 1.04] \quad y_{16} \in [0.89; 0.92] \end{aligned}$$

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ**

Таблиця 1 – Статистична інформація у розрізі основних характеристик процесу гранолоутворення

№	K	P <sub>p</sub>	d <sub>к</sub>	T <sub>вих</sub>	CaO/SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SO <sub>3</sub>	W	d <sub>e</sub> <sup>2</sup>
1	1,01	0,01	0,12	97,00	1,24	8,60	48,00	3,10
2	1,01	0,02	0,12	97,00	1,24	8,60	48,00	3,03
3	0,99	0,03	0,12	97,00	1,24	8,60	48,00	2,82
4	0,99	0,04	0,12	97,00	1,24	8,60	48,00	2,73
5	0,99	0,05	0,12	97,00	1,24	8,60	48,00	2,71
6	0,98	0,06	0,12	97,00	1,24	8,60	48,00	2,66
7	0,98	0,06	0,10	97,00	1,24	8,60	48,00	2,63
8	0,99	0,06	0,12	97,00	1,24	8,60	48,00	2,71
9	0,99	0,06	0,15	97,00	1,24	8,60	48,00	2,77
10	0,99	0,06	0,18	97,00	1,24	8,60	48,00	2,80
11	1,00	0,06	0,21	97,00	1,24	8,60	48,00	2,90
12	1,01	0,06	0,24	97,00	1,24	8,60	48,00	3,03
13	1,03	0,06	0,27	97,00	1,24	8,60	48,00	3,40
14	1,02	0,06	0,12	93,00	1,24	8,60	48,00	3,18
15	0,99	0,06	0,12	95,00	1,24	8,60	48,00	2,71
16	0,99	0,06	0,12	97,00	1,24	8,60	48,00	2,77
17	0,99	0,06	0,12	99,00	1,24	8,60	48,00	2,80
18	1,00	0,06	0,12	101,00	1,24	8,60	48,00	2,90
19	1,00	0,06	0,12	103,00	1,24	8,60	48,00	2,90
20	1,02	0,06	0,12	105,00	1,24	8,60	48,00	3,18
21	1,02	0,06	0,12	97,00	1,52	8,60	48,00	3,23
22	1,01	0,06	0,12	97,00	1,61	8,60	48,00	3,03
23	0,99	0,06	0,12	97,00	1,72	8,60	48,00	2,78
24	0,99	0,06	0,12	97,00	1,80	8,60	48,00	2,71
25	0,98	0,06	0,12	97,00	1,91	8,60	48,00	2,61
26	1,02	0,06	0,12	97,00	1,24	7,30	48,00	3,23
27	1,01	0,06	0,12	97,00	1,24	7,50	48,00	3,03
28	0,99	0,06	0,12	97,00	1,24	7,80	48,00	2,78
29	0,99	0,06	0,12	97,00	1,24	8,00	48,00	2,71
30	0,98	0,06	0,12	97,00	1,24	8,60	48,00	2,61
31	1,04	0,06	0,12	97,00	1,24	8,60	43,00	3,51
32	1,02	0,06	0,12	97,00	1,24	8,60	46,00	3,13
33	1,00	0,06	0,12	97,00	1,24	8,60	49,00	2,90
34	0,99	0,06	0,12	97,00	1,24	8,60	52,00	2,80
35	0,99	0,06	0,12	97,00	1,24	8,60	55,00	2,71

Співвідношення CaO / SO<sub>3</sub>

$$y_{17} = 0,947 \quad K_{17} \in [0,98; 1,04] \quad y_{17} \in [0,65]$$

$$y_{18} = K_{18} \quad K_{18} \in [0,98; 1,0] \quad y_{18} \in [0,67; 1,0]$$

$$y_{19} = -4,979K_{19} + 5,9 \quad K_{19} \in [0,98; 1,02] \quad y_{19} \in [0,8; 1,0]$$

$$y_{20} = -7,5K_{20} + 8,45 \quad K_{20} \in [1,02; 1,04] \quad y_{20} \in [0,65; 0,8]$$

Співвідношення P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> / SO<sub>3</sub>

$$y_{21} = -2K_{21} + 2,89 \quad K_{21} \in [0,99; 1,02] \quad y_{21} \in [0,85; 0,91]$$

$$y_{22} = -9K_{22} + 9,82 \quad K_{22} \in [0,98; 0,99] \quad y_{22} \in [0,91; 1,0]$$

$$y_{23} = 1 \quad K_{23} \in [0,98; 1,04] \quad y_{23} \in [1]$$

$$y_{24} = 7.5K_{24} - 6.8 \quad K_{24} \in [1.02; 1.04] \quad y_{24} \in [0.85; 1.0]$$

Вологість,  $W$

$$y_{25} = -1.581K_{25} + 2.34 \quad K_{25} \in [0.98; 1.04] \quad y_{25} \in [0.78; 0.87]$$

$$y_{26} = 12.873K_{26} - 11.87 \quad K_{26} \in [0.98; 0.99] \quad y_{26} \in [0.87; 1.0]$$

$$y_{27} = -3.25K_{27} + 4.2 \quad K_{27} \in [0.99; 1.03] \quad y_{27} \in [0.87; 1.0]$$

$$y_{28} = -9K_{28} + 10.14 \quad K_{28} \in [1.03; 1.04] \quad y_{28} \in [0.78; 0.87]$$

Система наведених рівнянь із зазначенням відповідних меж нечітко заданих величин і є математичною моделлю процесу гранулоутворення.

Останнім етапом є проведення досліджень методом математичного моделювання. Для цієї мети необхідно створити програмне забезпечення для автоматизації проведення оцінки коефіцієнта гранулоутворення в залежності від чисельних значень факторних ознак з використанням комп'ютерної техніки. Послідовність вирішення поставленої задачі представлена у вигляді наступного алгоритму (рис. 1).



Рисунок 1 – Алгоритм розв'язання задачі визначення залежності коефіцієнта гранулоутворення від формуючих його факторів у вигляді нечітко заданих величин

На підставі виконаного алгоритму була розроблена програма розрахунку в Microsoft Excel.

Результати досліджень показали, що при завданні гранулометричного складу в розрізі 3-х фракцій: 0,5–1,5 мм = 1 %, 1,5–4 мм = 97 %, 4–6 мм = 2 % необхідно підтримувати основні технологічні параметри в наступних діапазонах:  $P_2O_5/SO_3 = 8,3-8,6$ ;  $CaO/SO_3 = 1,81-1,91$ ;  $W = 43,1-43,9$  %, температура на виході БГС Твих, = 370,9–374,1 К, розрідження в БГС  $Pp = 0,011-0,018$  кПа, діаметр крапель розпилюємої пульпи  $d_k = 0,102-0,115$  мм.

Були проведені дослідно-промислові випробування на промисловій установці ВАТ «Сумхімпром», які підтвердили результати математичного моделювання процесу. Похибка результатів склала 2,5 %.

Результати випробувань показали, що при отриманні основної гранулометричної фракції на рівні 97 % є можливість виключити з технологічної схеми системи класифікації, подрібнення, пилоочищення, транспортування зовнішнього ретуру. Це значно підвищує енергоефективність процесу та рівень його екологічної безпеки.

**Висновки.** Розроблена математична модель та програмне забезпечення процесу гранулоутворення мінеральних добрив. Аналіз результатів показав, що математична модель адекватно описує даний процес. Визначено оптимальні технологічні параметри процесу, підтримання яких дозволяє отримати товарну продукцію необхідного фракційного складу.

#### Література

1. Клименко Р.Н. Процесс кислотного разложения сирийского фосфорита / Р.Н. Клименко, В.И. Тошинский, С.В. Дудка // Східно-європейський журнал передових технологій. – Харків: ЧП "Технологічний центр", 2010. – № 5. – С. 4–7.
2. Дудка С.В. Исследование процесса пульпообразования в технологии гранулирования фосфоросодержащих удобрений марки "Суперагро NPS 10:40:5" / С.В. Дудка, В.И. Тошинский, Р.Н. Клименко // Интегрированные технологии та енергозбереження. – Харків: НТУ "ХП", 2012. – № 3. – С. 97–104.
3. Деменков Н.П. Нечетное управление в технических системах / Н.П. Деменков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 200 с.
4. Рыбин В.В. Основы теории нечетких множеств и нечеткой логики / В.В. Рыбин. – М.: МАИ, 3007. – 96 с.
5. Корнієнко Я.М. Вплив технологічних параметрів на кінетику процесу гранулоутворення органічних мінеральних добрив / Я.М. Корнієнко // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2001. – № 4. – С. 141–148.

#### Bibliography (transliterated)

1. Klimenko R.N. Protsess kislotnogo razlozheniya siriyskogo fosforita. R.N. Klimenko, V.I. Toshinskiy, S.V. Dudka. Shidno-Evropeyskiy zhurnal peredovih tehnologiy. – Harkiv: ChP "Tehnologichniy tsentr", 2010. – # 5. – P. 4–7.
2. Dudka S.V. Issledovanie protsessa pulpoobrazovaniya v tehnologii granulirovaniya fosforosoderzhashchih udobreniy marki "Superagro NPS 10:40:5" / S.V. Dudka, V.I. Toshinskiy, R.N. Klimenko. Integrovani tehnologii ta energozberezhennya. – Harkiv: NTU "HPI", 2012. – # 3. – P. 97–104.
3. Demenkov N.P. Nchetnoe upravlenie v tehniceskikh sistemah. N.P. Demenkov. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2005. – 200 p.
4. Ryibin V.V. Osnovy teorii nechetkih mnozhestv i nechetnoy logiki. V.V. Ryibin. – M.: MAI, 3007. – 96 p.
5. Kornienko Ya.M. Vpliv tehnologichnih parametrov na kinetiku protsesu granuloutvorenniya organomineralnih dobriv. Ya.M. Kornienko. Naukovi visti NTUU "KPI". – 2001. – # 4. – P. 141–148.

УДК 661.152.32

Дудка С.В., Подустов М.А., Дзевочко А.М., Рищенко И.М., Кушинський С.И.

#### **РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ГРАНУЛООБРАЗОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ**

В статье приведены данные по разработке математической модели и программного обеспечения процесса гранулообразования минеральных удобрений. Определены оптимальные технологические параметры данного процесса для получения товарной продукции необходимого качества.

Dudka, S.V., Podustov M.A., Dzevoshko A.M., Rushenko I.M., Kushinsky S.I.

#### **DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS AND SOFTWARE PROCESS GRANULOMETRY MINERAL FERTILIZERS**

The article presents data on the development of mathematical models and software process granulometry mineral fertilizers. Defined optimal technological parameters of the process for obtaining commercial products of the required quality.