

УДК 66.0:51.001.57.532.785

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛЮВАННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ У АПАРАТІ З ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ

Б. Я. Корнієнко, канд. техн. наук, доц.

Національний авіаційний університет

e-mail: bogdanko@i.ua

Наведено алгоритм ідентифікації процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі при одержанні гранульованого продукту заданого дисперсного складу. Визначені умови характеризують стійку кінетику гранулоутворення безперервного безрециклового процесу із збільшенням масової частки гранул заданого діаметра на 40 %.

Ключові слова: ідентифікація, мінеральні добрива, гранулювання, псевдозріджений шар.

The article describes an algorithm identification process of dehydration and granulation in a fluidized bed in the preparation of granulated product specified particulate composition. The conditions characterizing the kinetics of stable continuous granulation process with increasing mass fraction of a given granule diameter by 40 %.

Keywords: identification, fertilizers, granulation, fluidized bed.

Вступ

Зростання потреб людства у продовольстві ставить перед виробниками вимоги щодо підвищення врожайності основних сільськогосподарських культур.

Для досягнення цієї мети аграрному сектору необхідно активне використання різних типів мінеральних добрив нового покоління. Хімічне виробництво належить до найбільш інноваційних та наукоємних галузей промисловості. При щорічному збільшенні попиту на мінеральні добрива на 5–8 % особлива увага приділяється якості готового продукту, яка визначається рівномірним розподіленням макро- і мікрокомпонентів по всьому об'єму гранул, розміри яких знаходяться в межах 1,8–4,5 мм і мають міцність більше 10 Н на гранулу. Гранули із найліпшою структурою та агрохімічними властивостями мають розмір від 2 до 3 мм.

Мінеральні добрива модифіковані необхідними мінеральними та органічними домішками із заданими властивостями найбільш доцільно отримувати шляхом зневоднення і грануляції в апаратах із псевдозрідженим шаром.

Розроблена математична модель процесу зневоднення і гранулювання у псевдозрідженому шарі [1]. Гранулювання у псевдозрідженому шарі супроводжується багатофакторними тепломасообмінними процесами росту гранул. Стійкість кінетики безрециклового процесу гранулоутворення визначається механізмом подрібнення частин великих гранул в апараті, що пов'язане з утворенням нових центрів грануляції і збільшення розмірів твердих частинок за рахунок утворення шару мікрочастин на їх поверхні [2].

Тому виникла потреба параметричної ідентифікації процесу зневоднення і гранулювання.

Одними з визначальних параметрів процесу є коефіцієнт температуропровідності емульсійної фази, коефіцієнти тепло- і масообміну. Але відсутність можливості постійного вимірювання температури та забезпечення великої кількості датчиків у апараті з псевдозрідженим шаром значно ускладнює завдання ідентифікації за температурним режимом. Метою цього процесу є отримання готового продукту заданого дисперсного складу, неперервне визначення якого є важко реалізованим завданням. Але наявність оптичних приладів для визначення еквівалентного діаметра гранул дозволяє провести ідентифікацію процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі за гранулометричним складом.

На сьогодні існує цілий ряд способів обчислення параметрів математичної моделі процесів у псевдозрідженому шарі. Відомі як аналітичні [3], так і чисельні методи. Чисельні методи засновані на зведенні задач ідентифікації до крайових задачах для звичайних диференціальних рівнянь. В основу цих розв'язків покладено методи теорії оптимального управління з використанням рівнянь динаміки об'єкта і спряжених рівнянь [4–6].

Для ідентифікації часто використовується необхідна умова стаціонарності функціоналу [7; 8]. Оскільки ця умова локальна, то для нелінійних задач алгоритм ідентифікації може зводитися до локального екстремуму.

Постановка задачі

У статті наведено алгоритм ідентифікації процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі при одержанні гранульованого продукту заданого дисперсного складу.

Виклад основного матеріалу дослідження

Завдання ідентифікації сформульоване у вигляді задачі мінімізації функціонала нев'язки, який має вигляд:

$$I = \frac{1}{2} \int_0^{d_m} q(D) \left[\frac{g(D, t_f)}{D} - \frac{1}{d_{e.з.д}} \right]^2 dD \rightarrow \min, \quad (1)$$

де $g(D, t_f)$ — функція розподілу маси гранул за розмірами, 1/мм; D — діаметр гранул, мм; $d_{e.з.д}$ — еквівалентний заданий діаметр гранул, мм; $q(D)$ — вагові коефіцієнти.

Для того щоб не вводити нелінійність за масовою часткою фракцій, запропоновано функцію еквівалентного діаметра.

Еквівалентний діаметр частинок у псевдозрідженому шарі визначається за виразом:

$$d_e = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{D_i}}, \quad (2)$$

де g_i — масова частка i -ої фракції, 1/мм; D_i — середній діаметр i -ої фракції, мм.

Для задачі ідентифікації використовується математична модель функції розподілу маси гранул за їх розмірами $g(D, t)$ під час протікання процесу сушіння в першому періоді [9]:

$$\frac{\partial g(D, t)}{\partial t} + 2 \left(v \frac{\partial g(D, t)}{\partial D} - 3 \frac{g(D, t)v}{D} \right) = -S\eta K_r g(D, t) + \Phi(D), \quad (3)$$

з початковими та граничними умовами:

$$g(D, 0) = g^b; \quad g(0, t) = g^0, \quad (4)$$

де v — лінійна швидкість зростання гранул, мм/с; D — діаметр гранул i -ї фракції, мм; η — коефіцієнт гранулоутворення; $\eta = \frac{G_B}{G_M}$; G_B —

продуктивність по гранульованому продукту, кг/с; G_M — кількість сухих речовин, що надходить до апарату з розчином, кг/с; S — функція сепаратора, що враховує селективне вивантаження з апарату; K_r — константа вивантаження, 1/с; $\Phi(D)$ — функція, що враховує стікання частинок за рахунок вивантаження з апарату та подрібнення частини великих гранул, тобто є алгебричною сумою інтегралів стікання і джерела, 1/мм·с.

Експериментально встановлено, що константа вивантаження K_r залежить від різниці температур теплоносія на вході до апарату і частинок в емульсійній фазі. Отже, в псевдозрідженому

шарі зі зміною температури T_1 зміниться розподіл маси гранул за їх розмірами. Константу вивантаження запишемо у вигляді:

$$K_r = K_1 (T_{20} - T_1), \quad (5)$$

де K_1 — коефіцієнт, що впливає на константу вивантаження, 1/К·с.

Рівняння розподілу гранул за розміром з урахуванням залежності коефіцієнта вивантаження від різниці температур теплоносія на вході в апарат T_{20} та температури частинок в емульсійній фазі T_1 :

$$\frac{\partial g(D, t)}{\partial t} = -2 \left(v \frac{\partial g(D, t)}{\partial D} - 3 \frac{g(D, t)v}{D} \right) - S\eta K_1 (T_{20} - T_1) g(D, t) + \Phi(D). \quad (6)$$

Таким чином, для різних температурних режимів за висотою шару можна розраховувати розподіл маси гранул за діаметрами.

Для ідентифікації параметра K_1 використано варіаційний підхід до побудови алгоритму оцінки. Перевага такого підходу полягає в можливості отримання більш точних оцінок параметрів порівняно з іншими методами, зокрема, з методом найменших квадратів.

У критерії оптимальності врахована математична модель:

$$I = \frac{1}{2} \int_0^{d_m} q(D) \left[\frac{g(D, t_f)}{D} - \frac{1}{d_{e.з.д}} \right]^2 dD + \int_0^{t_f} \int_0^{d_m} \lambda \left(-\frac{\partial g(D, t)}{\partial t} - 2v \frac{\partial g(D, t)}{\partial D} + 6 \frac{g(D, t)v}{D} - S\eta K_1 (T_{20} - T_1) g(D, t) + \Phi(D) \right) dD dt. \quad (7)$$

Лагранжیان задачі безумовної мінімізації:

$$L(K_1) = \lambda(D, t) \left(-\frac{\partial g(D, t)}{\partial t} - 2v \frac{\partial g(D, t)}{\partial D} + 6 \frac{g(D, t)v}{D} - S\eta K_1 (T_{20} - T_1) g(D, t) + \Phi(D) \right). \quad (8)$$

Метою ідентифікації є визначення для рівняння (5) такого K_1^* , для якого справджувалася би умова $I(K_1^*) \leq I(K_1)$, при будь-якому допустимому значенні K_1 .

Реалізується розв'язок задачі параметричної ідентифікації в детермінованій постановці. При цьому необхідні умови задачі ідентифікації мають вигляд:

$$\frac{\partial L(K_1)}{\partial K_1} = -S\eta (T_{20} - T_1) g(D, t) \lambda(D, t), \quad (9)$$

де $L(K_1)$ — лагранжіан задачі безумовної мінімізації; $\lambda(D, t)$ — розв'язок спряженої задачі виду:

$$\frac{\partial \lambda(D, t)}{\partial t} = -2v \frac{\partial \lambda(D, t)}{\partial D} + \lambda(D, t) \left(-6 \frac{v}{D} + S\eta K_1 (T_{20} - T_1) \right) \quad (10)$$

з кінцевими та граничними умовами:

$$\lambda(D, t_f) = q(D) \left[\frac{g(D, t_f)}{D^2} - \frac{1}{d_{e.з.д} D} \right]; \quad (11)$$

$$\lambda(d_m, t) = 0.$$

Алгоритм ідентифікації коефіцієнта K_1 , що впливає на константу вивантаження, має такий вигляд:

1. Параметру K_1 надається початкове значення $K_1^s = K_1^0$, де s — індекс ітераційного циклу, та обчислюємо $g(D, t)$ відповідно до (6) та значення критерію I згідно з (1).

2. З використанням заданої величини K_1 знаходимо значення похідної $\frac{\partial L(K_1)}{\partial K_1}$ за допомогою співвідношення (9), розв'язуючи спряжене рівняння (10) з урахуванням (11).

3. Нова оцінка параметра, що ідентифікується визначається так:

$$K_1^{s+1} = K_1^s - \varepsilon_1 \frac{\partial L(K_1)}{\partial K_1}, \quad (12)$$

де ε_1 — крок градієнтної процедури.

4. Перевіряється умова

$$\frac{|I(K_1^{s+1}) - I(K_1^s)|}{I(K_1^s)} \leq \varepsilon, \quad (13)$$

ε — задана похибка обчислення параметра K_1 .

Якщо дана умова виконується, то обчисленням значенням коефіцієнта, що впливає на константу вивантаження, береться K_1^{s+1} і процедура ідентифікації завершується. В іншому випадку повертаємось до п. 2.

Для розв'язання задачі ідентифікації використовувалися дослідження роботи гранулятора із псевдозрідженим шаром при зневодненні і гранулюванні розчинів сульфату амонію.

У результаті розрахунку за наведеним алгоритмом з початковим значенням коефіцієнта $K_1 = 0,009$ одержані значення K_1 , при яких функція розподілу маси гранул змінюється відповідно до заданого еквівалентного діаметра гранул $d_{e.з.д} = 2,5$ мм.

Результати обчислення коефіцієнта K_1 наведено на рис. 1. При тривалості перехідного процесу 30 с основні зміни коефіцієнта K_1 відбуваються протягом останніх 3 с та характеризуються значним зменшенням коефіцієнта K_1 , що призводить до зменшення вивантаження гранул заданого еквівалентного діаметра з апарата.

Зміна розподілу маси гранул за розміром в результаті параметричної ідентифікації наведена на рис. 2. Після реалізації алгоритму ідентифікації масова частка гранул заданого розміру $d_{e.з.д} = 2,5$ мм зросла з 0,26 до 0,45, що суттєво покращило гранулометричний склад готового продукту.

Зміну критерію якості (1) у результаті параметричної ідентифікації подано на рис. 3.

Результати ідентифікації великою мірою залежать від вибору кроку градієнтної процедури, тому проведення ідентифікації за 19 ітерацій свідчить про ефективну роботу алгоритму. Критерій якості значно зменшується протягом перших трьох ітерацій.

На рис. 4 наведені зміни еквівалентного діаметра гранул за результатами експериментальних досліджень, обчислені за допомогою математичної моделі (6) та за результатами параметричної ідентифікації.

Висновки

У результаті досліджень розроблено алгоритм ідентифікації процесів зневоднення та гранулювання мінеральних добрив в апараті із псевдозрідженим шаром. Визначені умови характеризують стійку кінетику гранулоутворення безперервного безрециклового процесу із збільшенням масової частки гранул діаметром 2,5 мм на 40 %.

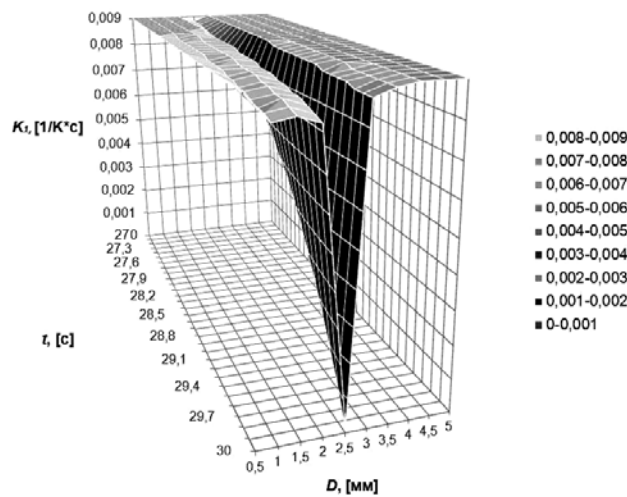


Рис. 1. Значення коефіцієнта K_1 у результаті параметричної ідентифікації

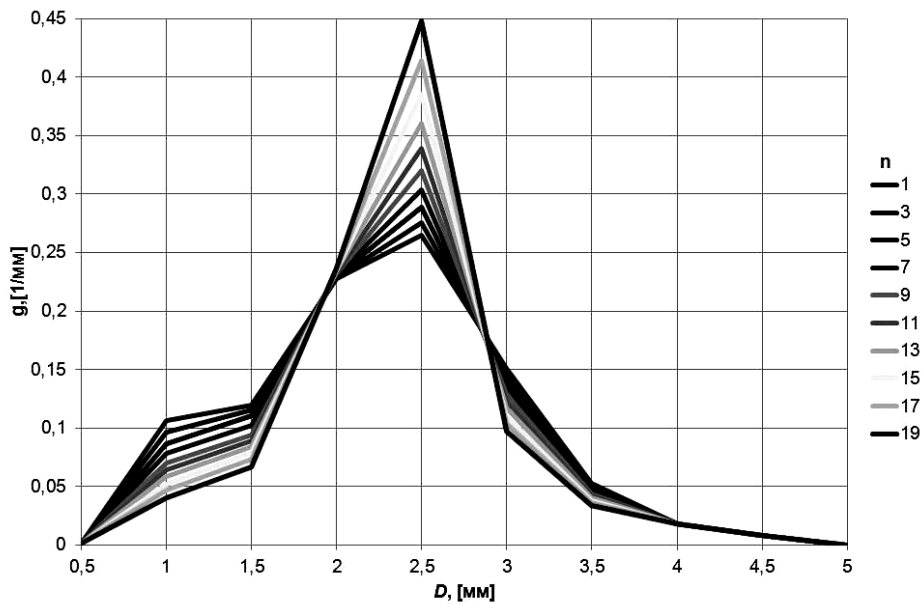


Рис. 2. Зміна розподілу маси гранул за розміром у результаті параметричної ідентифікації за 19 ітерацій

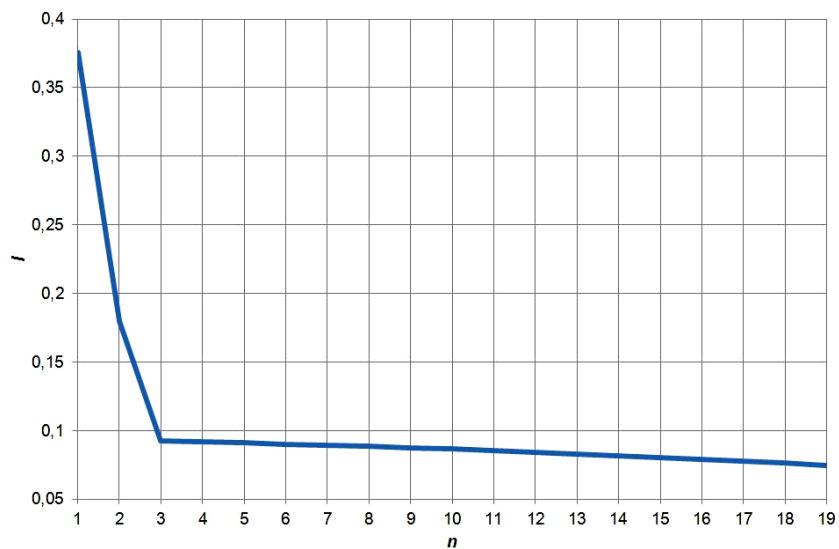


Рис. 3. Зміна критерію якості від кількості ітерацій

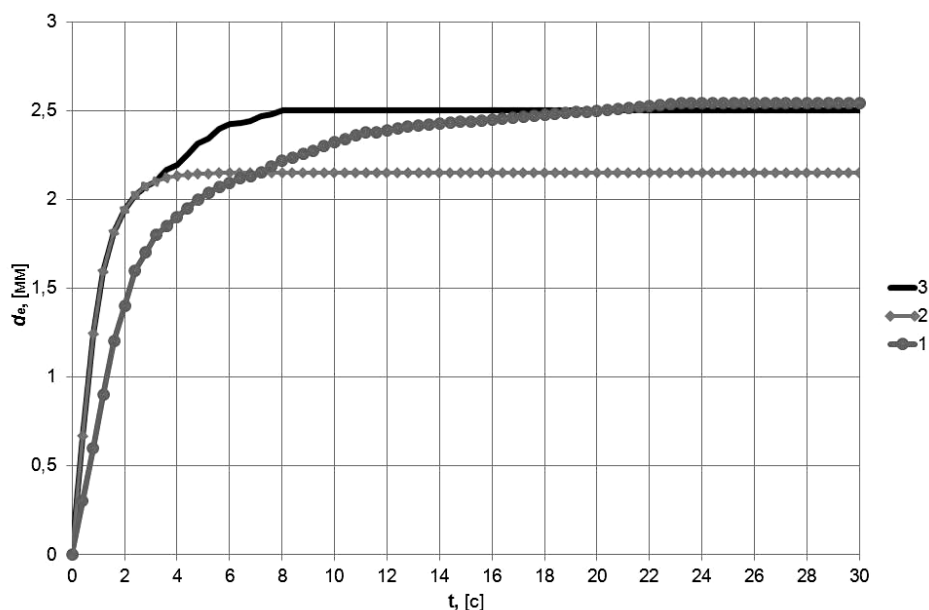


Рис. 4. Зміна еквівалентного діаметра гранул у часі:

1 — у результаті експериментальних досліджень; 2 — у результаті обчислень за математичною моделлю; 3 — у результаті параметричної ідентифікації

ЛІТЕРАТУРА

1. Корнієнко Б. Я. Двофазна модель процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». — 2012, № 2(10). — С. 31–35.
2. Льюнг Г. Идентификация систем. Теория для пользователя / Г. Льюнг. — М.: Наука, 1991.
3. Теплицкий Ю. С. К теории нестационарных методов определения эффективной температуры проводности псевдооживленного слоя // Известия АН БССР: Серия ФЭН. — 1980. — № 3. — С. 89–95.
4. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики / Г. И. Марчук. — М.: Наука, 1977. — 456 с.
5. Математическая теория оптимальных процессов / А. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамрекелидзе, Е. Ф. Мищенко. — М.: Наука, 1976. — 392 с.
6. Hwang M. A new algorithm for the estimation of parameters in ordinary differential equations // AIChE Journal / M. Hwang, J. H. Seinfeld. — 1972. — V. 18, № 1. — P. 90–93.
7. Идентификация моделей гидравлики / Г. Д. Бабе, Э. А. Бондарев, А. Ф. Воеводин, М. А. Каниболотский. — Новосибирск: Наука, 1980. — 160 с.
8. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления / П. Эйкхофф. — М.: Мир, 1975. — 684 с.
9. Тодес О. М. Обезвоживание растворов в кипящем слое / О. М. Тодес, Ю. Я. Каганович, В. А. Себалло и др. — М.: Metallurgiya, 1973. — 287 с.

REFERENCES

1. Korniyenko B. Y. Dvofazna model of dehydration and granulation in a fluidized bed // Proceedings of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" series "Chemical engineering, environment and resource conservation". — 2012, № 2 (10), S. 31–35. Ljuing Gri. Identifikazija system. Teorija dla polzovatelja. — M.: Nauka, 1991. — 284 s.
2. Lyunh G. Identification systems. Theory for the user / G. Lyunh. — M.: Nauka, 1991.
3. Teplytskyy Y. S. Number theory nestatsyonarnykh methods for determining the thermal EFFECTIVE psevdoozhivlennoho layer // Izvestiya AN BSSR: Series Fan. — 1980. — № 3. — P. 89–95.
4. Marchuk G. I. Methods of calculable mathematics / G. I. Marchuk. — M.: Nauka, 1977. — 456 p.
5. Matematycheskaya Theory optimalnykh processes / A. S. Pontryagin, V. G. Boltyanskyy, R. V. Hamrekelydze, E. F. Mishchenko — M.: Nauka, 1976. — 392 p.
6. Hwang M. A new algorithm for the estimation of parameters in ordinary differential equations // AIChE Journal / M. Hwang, J. H. Seinfeld. — 1972. — V. 18, № 1. — P. 90–93.
7. Identification Gidravlika models / G. D. Baabe, E. A. Bondarev, A. F. Vojvodina, M. A. Kanybolotskyy. — Novosibirsk: Nauka, 1980. — 160 p.
8. Eykhoff P. Identification Fundamentals of management / P. Eykhoff. — M.: Mir, 1975. — 684 p.
9. Todes O. M. Dehydration of solutions in kypyaschem sloe / O. M. Todes, Y. Y. Kaganovich, V. A. Seballo etc. — M.: Metallurgy, 1973. — 287 p.

Стаття надійшла до редакції 02.10.2013