

## ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ЗНЕВОДНЕННЯ ТА ГРАНУЛЮВАННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

*Розглянуто задачу статичної оптимізації зневоднення та гранулювання мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі за квадратичним критерієм якості. Одержано оптимальні значення витрат вихідного розчину й теплоносія – повітря.*

**Ключові слова:** оптимізація, псевдозріджений шар, зневоднення, гранулювання

© Корнієнко Б. Я., 2014.

**Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень.** Протягом останніх 15 років внаслідок дії кризових факторів у сільському господарстві України суттєво зріс дефіцит азотних, фосфорних, калійних і комплексних мінеральних добрив. Повноцінний урожай сільськогосподарських культур без використання добрив та сівозмін є майже неможливим. Для вирішення агроекологічних проблем, відновлення й підвищення родючості ґрунтів особливу увагу слід звернути на внесення органічної речовини в ґрунт у формі сучасних ефективних комплексних органо-мінеральних добрив, складовими компонентами яких є основні елементи мінерального живлення рослин (азот, фосфор, калій), мікродомішки та органічні гуміновмісні речовини (торф, сапропель, буре вугілля). Це дозволить поєднати корисні властивості органічних і мінеральних добрив, уникнувши недоліків, характерних для кожного з них. У технології виробництва мінеральних добрив однією з основних стадій формування якості продукту є гранулоутворення з подальшою чи одночасною стабілізацією структури (сушінням або охолодженням) та виділенням товарної фракції [1]. У багатьох випадках як енергоефективну застосовують техніку псевдозрідження [2].

Існує низка підходів до математичного моделювання зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі [3]. Для задачі оптимізації запропоновано використовувати математичну модель, що враховує взаємозв'язок між різними параметрами процесу за наявності двох фазових переходів – видалення розчинника та утворення шару мікрокристалів на поверхні гранул [4].

Промислова експлуатація грануляторів із псевдозрідженим шаром свідчить, що на надійну роботу такої технологічної системи впливає велика кількість чинників. Їх вплив на стійкість роботи технологічної системи виробництва добрив із заданими властивостями дотепер вивчено не повністю. Попри те, що деякі виробництва працюють понад 25 років, оптимальні режими ведення гранулювання й зневоднення не знайдені.

**Метою статті** є дослідження неперервного безрециклового процесу одержання гранульованого продукту заданого дисперсного складу та обговорення результатів статичної оптимізації зневоднення і гранулоутворення з водяних розчинів сульфату амонію із застосуванням гранулятора з псевдозрідженим шаром.

**Виклад основного матеріалу.** Враховуючи природу процесу, доцільною є оптимізація шляхом зміни витрат повітря й вивантаження частини продукту з апарата для підтримання заданого перепаду тиску в шарі [5]. Пропонується розглянути як керівні впливи витрати повітря й вихідного розчину.

Під час аналізу процесів, що супроводжуються фазовим переходом, із точки зору оптимізації, суттєвий вплив на кінетику процесу мають енергетичні показники. Мінімізуючи відхилення температури шару і витрат потужності на процес, вибрано квадратичний критерій якості:

$$I = 0,5q(T_{\text{ш}} - T_{\text{ш}}^{\text{зд}})^2 + 0,5r_1G_{\text{н}}^2 + 0,5r_2G_{\text{р}}^2 \rightarrow \min ;$$

де  $T_{\text{ш}}$  і  $T_{\text{ш}}^{\text{зд}}$  – поточна і задана температури псевдозрідженого шару, К;  $G_{\text{н}}$  і  $G_{\text{р}}$  – масові витрати теплоносія і розчину, кг/с;  $r_1, r_2, q$  – вагові коефіцієнти.

Як фактор обмеження вибрано число псевдозрідження  $K_w = W_p/W_{\text{кр}} > 2$ , де  $W_p$  – робоча швидкість теплоносія, м/с;  $W_{\text{кр}}$  – швидкість початку псевдозрідження, м/с.

Перепад тиску в псевдозрідженому шарі в загальному випадку  $\Delta P = H_0(1 - \varepsilon_0)\rho_{\text{ш}}g$ , де  $H_0$  – висота нерухомого шару, м;  $\varepsilon_0$  – порозність нерухомого шару;  $\rho_{\text{ш}}$  – густина твердих частинок, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – прискорення сили тяжіння,  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>;  $\Delta P_{\text{н}} \leq \Delta P \leq \Delta P_{\text{в}}$ , де  $\Delta P_{\text{н}}$  і  $\Delta P_{\text{в}}$  – нижня і верхня межі перепаду тиску, Па.

Коефіцієнт гранулоутворення  $\psi = (G_{\text{гр}}/G_{\text{р}}) \cdot 100 \% > 90 \%$ , де  $G_{\text{гр}}$  – продуктивність гранулятора за гранульованим продуктом, кг/с;  $G_{\text{р}}$  – витрата сухих речовин, що надходять із робочим розчином до гранулятора, кг/с, є інтегральною характеристикою кінетики процесу гранулювання;  $\psi > 90 \%$ .

За стаціонарного процесу тепло- й масообміну, що має місце під час зневоднення й гранулювання у псевдозрідженому шарі:

– тепловий баланс за повітрям:  $G_{\text{н}}C_{\text{н}}(T_{\text{н}}^{\text{н}} - T_{\text{н}}^{\text{к}}) - \alpha F(T_{\text{н}}^{\text{к}} - T_{\text{ш}}) = 0$ , де  $C_{\text{н}}$  – початкова питома масова теплоємність теплоносія, Дж/(кг · К);  $T_{\text{н}}^{\text{н}}$  і  $T_{\text{н}}^{\text{к}}$  – початкова й кінцева температури теплоносія, К;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія до гранул, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $F$  – площа поверхні контакту фаз у псевдозрідженому шарі, м<sup>2</sup>;

– тепловий баланс частинок шару:  $\beta F(T_n^k - T_{ш}) - \nu(M_b F_m)/(RT_n) r_n \Delta p + G_p C T_p - G_p x_p Q_k = 0$ , де  $\beta$  – коефіцієнт масовіддачі,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $M_b$  – молекулярна маса води,  $\text{кг}/\text{моль}$ ;  $F_m$  – площа поверхні частинок у шарі,  $\text{м}^2$ ;  $R$  – універсальна газова стала,  $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ ;  $C$  – питома масова теплоємність матеріалу гранули,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $T_n$  і  $T_p$  – температури теплоносія й розчину,  $\text{К}$ ;  $\Delta p = \xi_1 T_{ш} - \xi_2 T_n^k$  – різниця парціальних тисків,  $\text{Па}$ ;  $\xi_1$  і  $\xi_2$  – числові коефіцієнти;  $x_p$  – масова частка сухих речовин у робочому розчині;  $Q_k$  – теплота кристалізації,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $r_n$  – питома теплота пароутворення,  $\text{Дж}/\text{кг}$ .

Перетворимо задачу умовної оптимізації в безумовну за допомогою множників Лагранжа:

$$L = 0,5q(T_{ш} - T_{ш}^{3\lambda})^2 + 0,5r_1 G_n^2 + 0,5r_2 G_p^2 + \lambda_1 (G_n C_n (T_n^n - T_n^k) - \alpha F (T_n^k - T_{ш})) + \\ + \lambda_2 \left( \beta F (T_n^k - T_{ш}) - \nu \frac{M_b d \Delta p_{ш}}{RT_n (1-\varepsilon) \rho_n g} r_n (\xi_1 T_{ш} - \xi_2 T_n^k) + G_p C T_p - G_p x_p Q_k \right) + \rho \left( \frac{1}{\Delta p - \Delta p_n} + \frac{1}{\Delta p - \Delta p_b} \right),$$

де  $L$  – функція Лагранжа,  $\lambda_1, \lambda_2$  – множники Лагранжа.

Обмеження на керування враховані за допомогою штрафних функцій. Необхідні умови оптимальності:

$$\frac{\partial L}{\partial T_n^k} = -\lambda_1 (G_n C_n + \alpha F) + \lambda_2 \alpha F = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial T_{ш}} = q(T_{ш} - T_{ш}^{3\lambda}) + \lambda_1 \alpha F + \lambda_2 \left( -\alpha F - \frac{\nu M_b \Delta p_{ш} r_n d}{c_n g RT_n (1-\varepsilon)} \xi_1 \right) = 0.$$

Частинні похідні за керуванням:

$$\frac{\partial L}{\partial G_n} = r_1 G_n + \lambda_1 C_n (T_n^n - T_n^k), \quad \frac{\partial L}{\partial G_p} = r_2 G_p - \lambda_2 x_p Q_k + \lambda_2 C_p T_p. \quad (1)$$

Задачу багатопараметричної оптимізації розв'язано з використанням градієнтного пошуку:

$$G_n^{k+1} = G_n^k - k_1 \frac{\partial L}{\partial G_n^k}, \quad G_p^{k+1} = G_p^k - k_2 \frac{\partial L}{\partial G_p^k}, \quad (2)$$

де  $k_1, k_2$  – кроки градієнтної процедури.

Реалізуємо алгоритм розрахунку задачі статичної оптимізації за допомогою градієнтної процедури:

Обчислюємо чергове значення керівних впливів  $G_p, G_n$ . Із рівняння  $f(G_p, G_n) = 0$  визначаємо  $T_n, T_{ш}$ . Знаходимо множники Лагранжа:

$$\lambda_1 = \frac{\beta F}{G_n C_n + \beta F} \lambda_2, \quad \lambda_2 = \frac{q(T_{ш} - T_{ш}^{3\lambda})}{\beta F + \frac{\nu M_b \Delta p_{ш} d r_n}{c_n g RT_n (1-\varepsilon)} \xi_1 - \frac{\beta^2 F^2}{G_n C_n + \beta F}}. \quad (10)$$

Знаходимо частинні похідні за вектором керування (1). Обчислюємо чергові значення вектора за градієнтною процедурою (2). Послідовність повторюємо. Якщо критерій якості не змінюється від ітерації до ітерації, обчислення припиняємо.

Розрахунки за наведеним алгоритмом свідчать, що температура псевдозріженого шару впродовж 13 ітерацій зростає з 365,5 К із виходом на задану 371 К (рис. 1). За експоненційного характеру зміни масової витрати теплоносія (рис. 2) масова витрата робочого розчину зменшується від 0,4 до 0,388 кг/с (рис. 3). Це пояснюється тим, що за сталої температури теплоносія на вході підвищення температури шару в межах 6 К, за відповідної зміни масової витрати теплоносія, зменшує кількість підведеної з теплоносієм теплоти. Відповідно з першої до восьмої ітерації відбувається зменшення критерію якості з 0,023 до 0,009 (рис. 4).

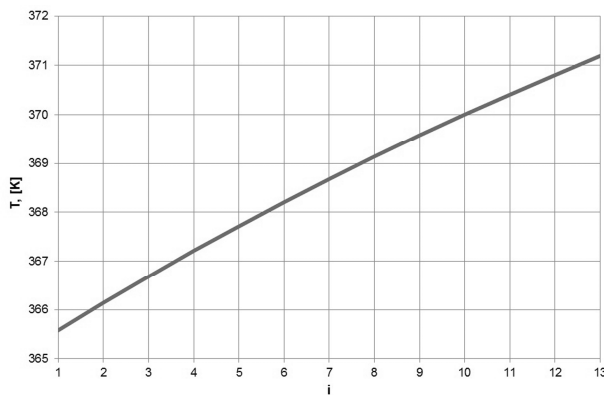


Рис. 1 – Температура псевдозріженого шару в результаті оптимального управління

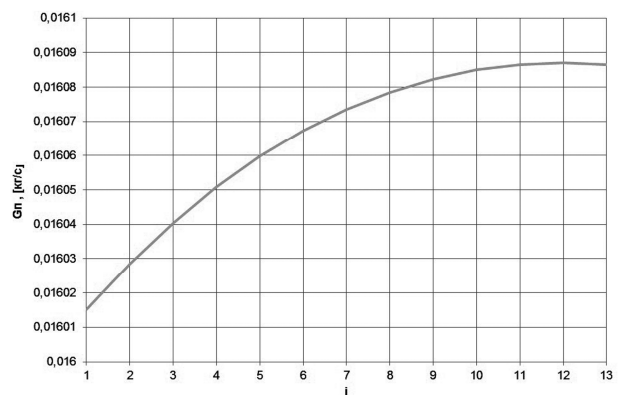
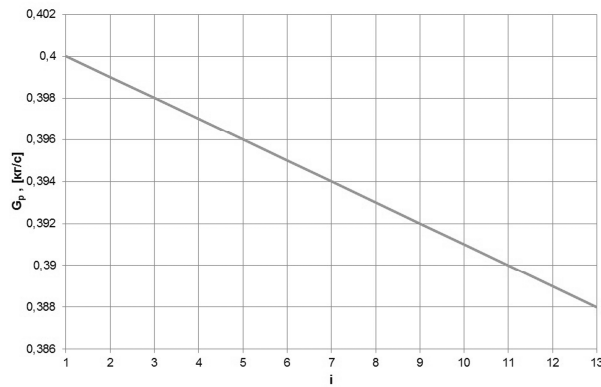
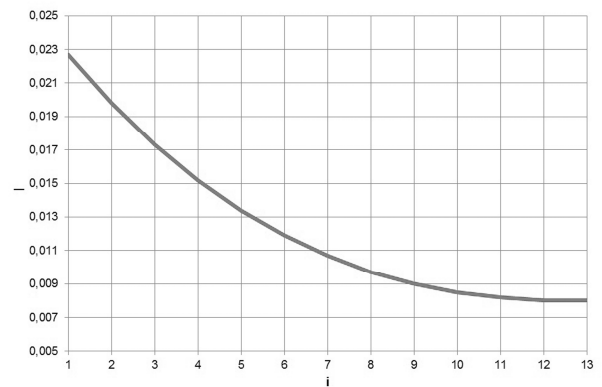


Рис. 2 – Зміна витрати теплоносія протягом оптимального управління



**Рис.3 – Зміна витрати вихідного розчину протягом оптимального управління**



**Рис. 4 – Зміна критерію якості протягом оптимального управління**

**Висновки.** Застосування статичної оптимізації за квадратичним критерієм якості дозволяє визначити вплив температури на енергоефективні параметри процесів зневоднення і грануляції. Для забезпечення сталості навантаження за робочим розчином варто адекватно підвищувати температуру теплоносія на вході до апарата. Збільшення масової витрати теплоносія обмежене витратою, за якої швидкість теплоносія в апараті дорівнює швидкості виносу мінімальних частинок. Залежність температури шару від керівних впливів показала наявність виражених локальних мінімумів.

#### Список використаної літератури

1. *Лыков А. В.* Теория сушки / А. В. Лыков. – М. : Энергия 1968. – 472 с.
- Муштаев В. И.* Сушка дисперсных материалов / В. И. Муштаев, В. М. Ульянов. – М. :Химия, 1988. – 352 с. – (Сер. «Процессы и аппараты в химической и нефтехимической технологии»).
- Корнієнко Б. Я.* Особливості моделювання процесів переносу у дисперсних системах / Б. Я. Корнієнко // Вісн. Нац. техн. ун-ту України «Київ. політехн. ін-т», сер. «Хім. інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2011. – № 2 (8). – С. 5–9.
- Корнієнко Б. Я.* Статичні та динамічні характеристики процесів переносу у дисперсних системах / Б. Я. Корнієнко // Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI 2013) : зб. наук. пр. міжнар. наук. конф. ; 27-31 трав. 2013 р. ; Євпаторія, Україна. – С. 170–172.
- Корнієнко Б. Я.* Оптимізація процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі // Б. Я. Корнієнко, Л. Р. Ладієва, І. Ф. Хрустальов // Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI 2012) : матер. міжнар. наук. конф. ; 27–31 трав. 2012 р. ; Євпаторія, Україна. – С. 88–90.

Надійшла до редакції 12.02.2014.