8. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. 2-е издание. – М.: Химия. – 1984. –590 с.

УДК 502.174.1:66.011

# МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ ТВЕРДИХ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНИХ КОМПОЗИТІВ

**Корнієнко Я.М. – д-р. техн. наук, професор,**
**Сачок Р.В., аспірант**
**Національний технічний університет України "КПІ"**

*Розроблено математичну модель безперервного процесу пошарового гранулоутворення твердих багатошарових гуміново-мінеральних композитів в апараті псевдозрідженого шару утилізації рідких промислових відходів з отриманням комплексних гранульованих добрив для екологічно безпечного землеробства і визначені умови стабілізації дисперсного складу за допомогою узагальненої функції втрат якості продукту.*

*The mathematical model of continuous granulation process of solid multi-layer humic-mineral composites in the fluidized bed unit intended for liquid industrial wastes utilization with obtaining of complex granular fertilizers for environmentally safe agriculture was developed and the stabilization terms of the dispersion composition were defined by the generalized function of losses of quality of product.*

**Ключові слова:** псевдозріджений шар, дисперсний склад, гуміново-мінеральні багатошарові композити, функція потужності джерела нових центрів грануляції, еквівалентний діаметр, функція втрат якості

Загострення екологічних проблем в умовах постіндустріального суспільства вимагає впровадження нових принципів користування природними ресурсами, в першу чергу серед яких — призупинення виснаження родючих ґрунтів, які складають більше 70 % національного багатства України.

Тому розробка технології одержання нового покоління гуміново-мінеральних гранульованих добрив із змінним співвідношенням поживних і стимулюючих речовин, які визначаються агроекологічними та ґрунтово-кліматичними умовами регіону їх застосування, є актуальною.

Авторами [1] запропонований спосіб одержання твердих багатошарових гуміново-мінеральних композитів із застосуванням техніки псевдозрідження, як ресурсо- та енергоощадної технології. Цей метод дозволяє отримати гуміново-мінеральні добрива з змінним співвідношенням гумінових, мінеральних, поживних та стимулюючих речовин, що розподіляються на нанорівні завдяки технології внесення робочого розчину різних складів.

Експериментальними дослідженнями [2,3] встановлено, що вміст гумінових речовин не повинен перевищувати 1 ÷ 2 % по відношенню до сухих речовин, тоді як кількість мінеральних N:P:K компонентів змінюється в межах 10 ÷ 20 %.

Багаторічними агродослідженнями встановлено високу ефективність гуміново-мінеральних добрив на кислих ґрунтах, при наявності у їх складі домішок кальцію в межах 5 ÷ 8 %. [3] Тому основними вимогами до гуміново-мінеральних твердих композитів є рівномірність розподілення компонентів та мікродомішок по всьому об’єму гранули на рівні 100 – 1000 нм.

**Фізична модель**

Рідка фаза диспергується в двофазну систему: зернистий матеріал – газовий теплоносій, рис.1, і за рахунок дії адгезійно-сорбційних сил утримується на поверхні твердих частинок у вигляді надтонкої плівки, до якої від нагрітих твердих частинок і газового теплоносія підводиться теплота. Це призводить до інтенсивного випаровування розчинника в результаті чого на поверхні твердих частинок утворюється тонкий шар з мікрокристалів мінеральних речовин та осаджених між ними колоїдних часток гумінових сполук з розмірами $10^{-6} – 10^{-7}$ м.

Такий механізм утворення багатошарових твердих композитів забезпечує рівномірність розподілення колоїдних частинок гумінових речовин на рівні 0,8 − 1,5 %(мас) та міцність більше 7Н/гранулу. Одержаний готовий продукт – 90% за масою сфероподібних частинок з розмірами 1,5 – 4,5 мм.

Враховуючи стохастичний характер процесу, в реальних умовах два типи утворення гранул: пошаровий та агломераційний. Для першого типу можливо прогнозування зміни розмірів частинок, а для другого випадку це зробити неможливо. Основним завданням є стабілізація кінетики безперервного процесу

утворення багатошарових композитів із заданими властивостями при значеннях коефіцієнта гранулоутворення $\psi \geq 90\%$.

Попередніми дослідженнями [3] були визначені технологічні умови, при яких забезпечуються такі значення коефіцієнту гранулоутворення.

**Математична модель**

В основу математичної моделі процесу авторами [4] покладено рівняння нерозривності, яке після розвитку авторів [5] записується в частинних похідних у вигляді

$$\frac{\partial g}{\partial \tau} + 2\left[\Lambda \frac{\partial g}{\partial D} + g\frac{\partial \Lambda}{\partial D} - \frac{3\Lambda g}{D}\right] = -S\psi Kg + \varphi(D),\ \tau>0,\ 0<D<\infty, \quad (1)$$

де g — функція масового розподілення гранул за розмірами, мм$^{-1}$; $\tau$ — час, год; $D$ — поточний діаметр гранул, мм; $\Lambda$ — лінійна швидкість росту гранул, мм/год; $S$ — функція сепарації; $\psi$ — коефіцієнт гранулоутворення, частка; $K$ — константа вивантаження, год$^{-1}$; $\varphi$ — функція потужності джерела центрів грануляції, (мм×годину)$^{-1}$.

Якщо прийняти нульовий порядок росту гранул, $\frac{\partial \Lambda}{\partial D} = 0$, то рівняння (1) набуває вигляду:

$$\frac{\partial g}{\partial \tau} + 2\left[\Lambda \frac{\partial g}{\partial D} - \frac{3\Lambda g}{D}\right] = -S\psi Kg + \varphi(D),\ \tau>0,\ 0<D<\infty, \quad (2)$$

З рівняння (2) функція потужності джерела центрів грануляції визначиться, як:

$$\varphi(D) = \frac{\partial g}{\partial \tau} + 2\left[\Lambda \frac{\partial g}{\partial D} - \frac{3\Lambda g}{D}\right] + S\psi Kg, \quad (3)$$

Для стаціонарного процесу, коли $\frac{\partial g}{\partial \tau} = 0$ рівняння (3) набуває вигляду:

$$\varphi(D) = 2\left[\Lambda \frac{\partial g}{\partial D} - \frac{3\Lambda g}{D}\right] + S\psi Kg. \quad (4)$$

Для розв'язку рівняння (4) параметри g, ψ, K і Λ необхідно визначити з експерименту.

Авторами встановлено, що функція масового розподілення гранул за розмірами з вірогідністю 0,95 описується $\gamma$ — розподіленням:

$$g = \frac{z^n}{(n-1)!} D^{*(n-1)} \cdot e^{-zD^*}, \quad (5)$$

де – n і z — параметри γ – розподілення, які визначались за дослідними даними, а D* — приведений діаметр.

Поріг сепарації $D_0$ визначався з вимог дисперсного складу готового продукту: 90 % гранул за масою мають розмір 1,5 – 4,5 мм, з виразу для функції сепарації:

$$S = \frac{D^5}{D^5 + D_0^5},$$

де D – поточний діаметр; $D_0$ – поріг сепарації. Виходячи з цих умов, $D_0$ = 2,3 мм.

**Результати експериментальних досліджень**

Досліджувались кінетичні характеристики безперервного процесу утворення трьох типів гуміново-мінеральних твердих композитів: I – гуміново-азотних – Г:N=1:20; II – гуміново-азотно-кальцієвих – Г:N:Ca = 1:15:12; III – гуміново-азотно-калійно-кальцієвих Г:N:K:Ca = 1:15:8:5.

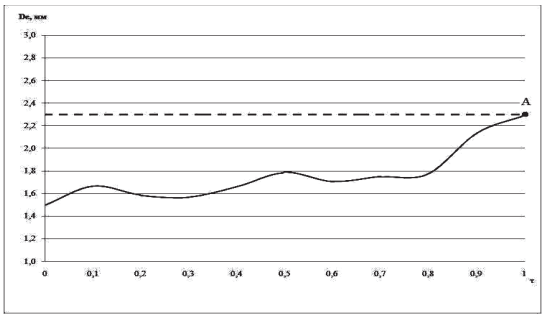
На рис. 1 наведені основні кінетичні характеристики процесу утворення гуміново-азотних твердих композитів.

Динаміка зміни еквівалентного діаметра $D_e$=f(τ), рис. 1а) носить монотонний характер і стабілізація в точці А не спостерігається. Динаміка зміни масового розподілу гранул за розмірами в шарі, рис. 1б), свідчить про реалізацію пошарової моделі росту гранул, і задовільно описується γ-розподіленням з середнім коефіцієнтом кореляції ρ=0,92, рис 1в).

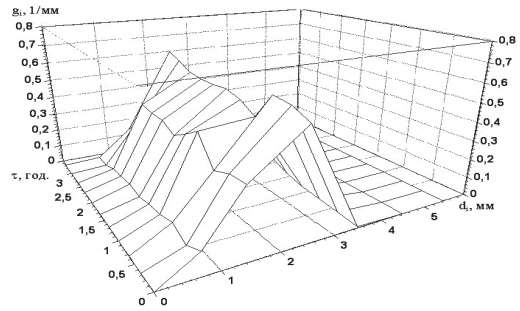
Порівняння масових розподілів гранул в апараті та в готовому продукті, рис. 1г), показує їх високу збіжність і описується γ-розподіленням з коефіцієнтом кореляції ρ=0,95. Тому вивантаження готового продукту проводиться без сепарації S=1.

Порівняння функції потужності джерела нових центрів грануляції, рис 1д), показує недостатню потужність в діапазоні розмірів $0,8 \leq d \leq 2,1$ мм. Стабілізація еквівалентного діаметра на рівні $D_e$ = 2,3

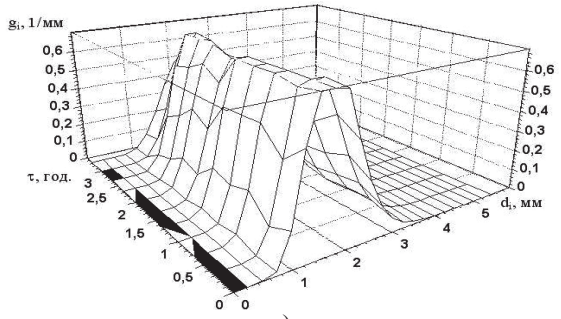
мм з відповідним дисперсним складом можлива при подачі зовнішнього рециклу, потужність якого визначається за даними рис 1д).



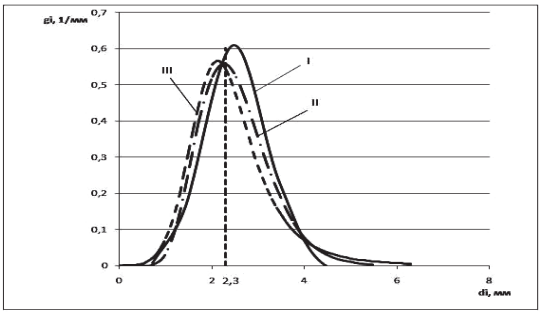

а)



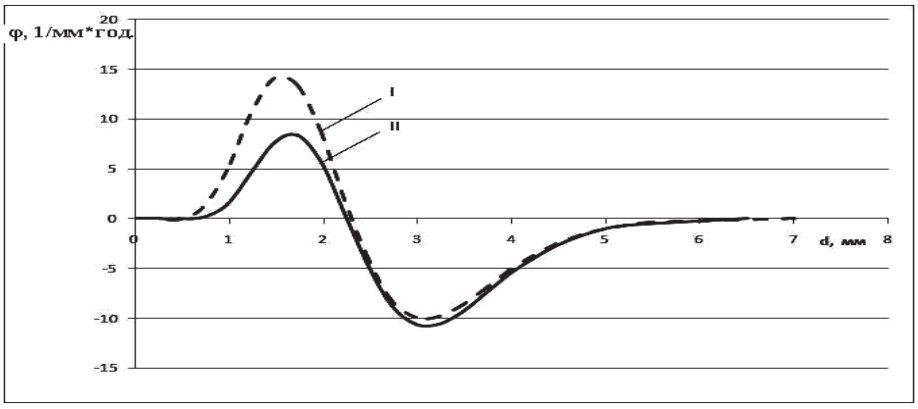

б)




в)



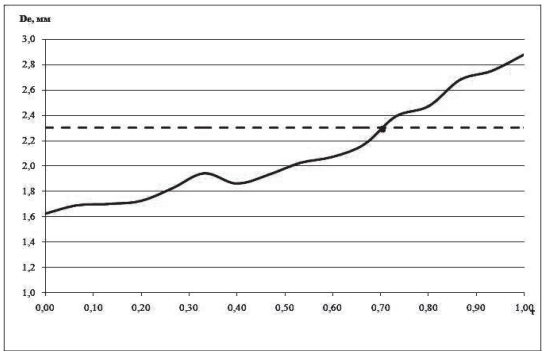

г)



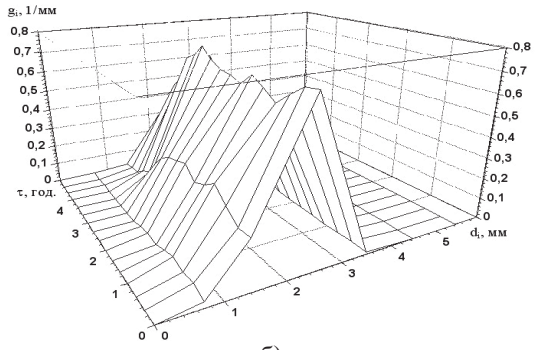

д)

*а) динаміка зміни еквівалентного діаметру; б) динаміка масових розподілів гранул; в) апроксимація динаміки масових розподілів; г) порівняння експериментального та розрахункового масових розподілів із заданим розподіленням готового продукту, I – експериментальний, II – розрахунковий, III – заданий д) порівняння функцій джерела та стоку частинок в стаціонарному режимі, I - експериментальні , II – розрахункові*

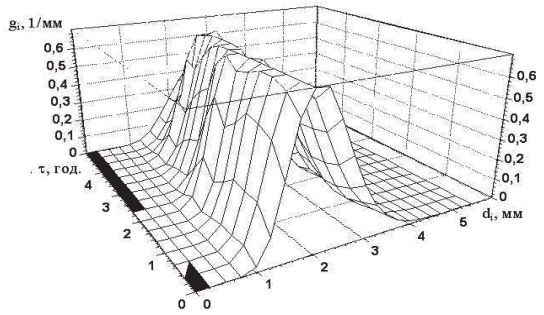
**Рис. 1 - Результати експериментальних досліджень при одержанні гуміново-азотних твердих композитів**



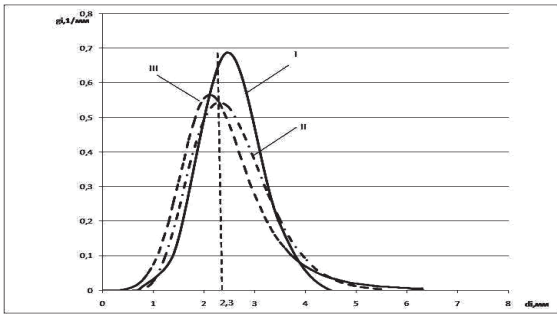

а)



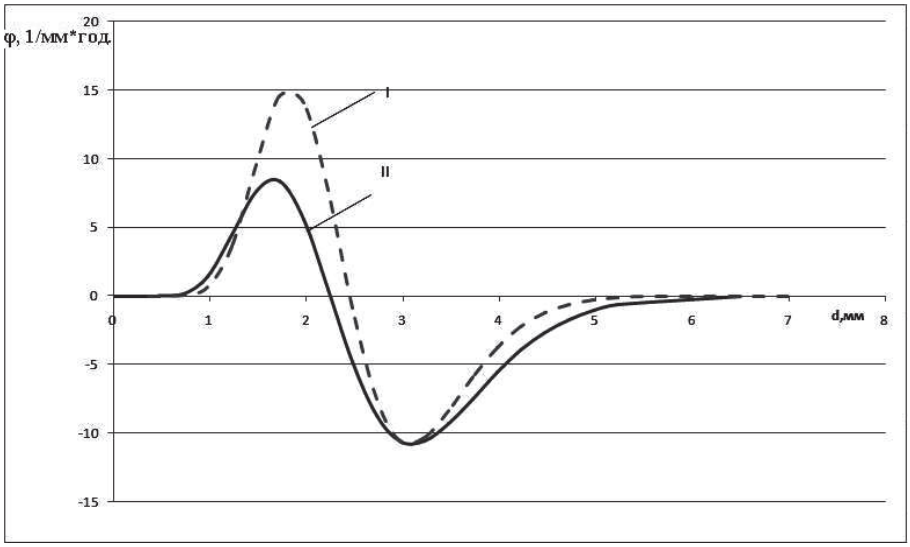

б)




в)



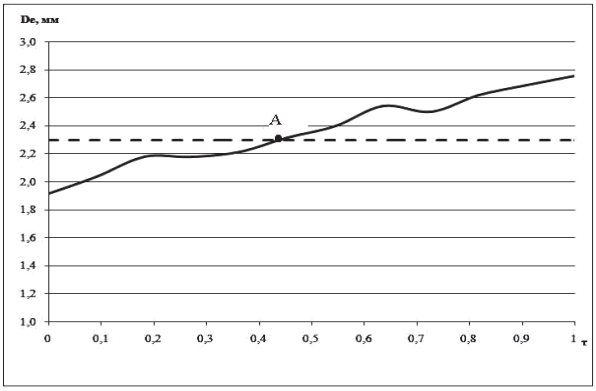

г)



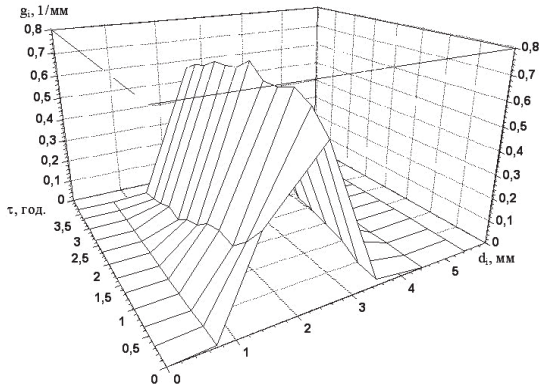

д)

*а) динаміка зміни еквівалентного діаметру; б) динаміка масових розподілів гранул; в) апроксимація динаміки масових розподілів; г) порівняння експериментального та розрахункового масових розподілів із заданим розподіленням готового продукту, I – експериментальний, II – розрахунковий, III – заданий д) порівняння функцій джерела та стоку частинок в стаціонарному режимі, I - експериментальні , II – розрахункові*

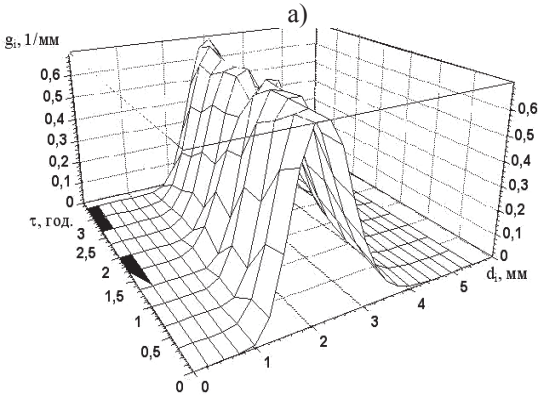
**Рис. 2 - Результати експериментальних досліджень при одержанні гуміново-азотно – кальцієвих твердих композитів**



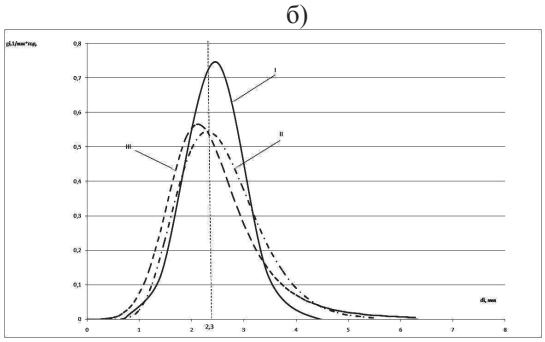

а)



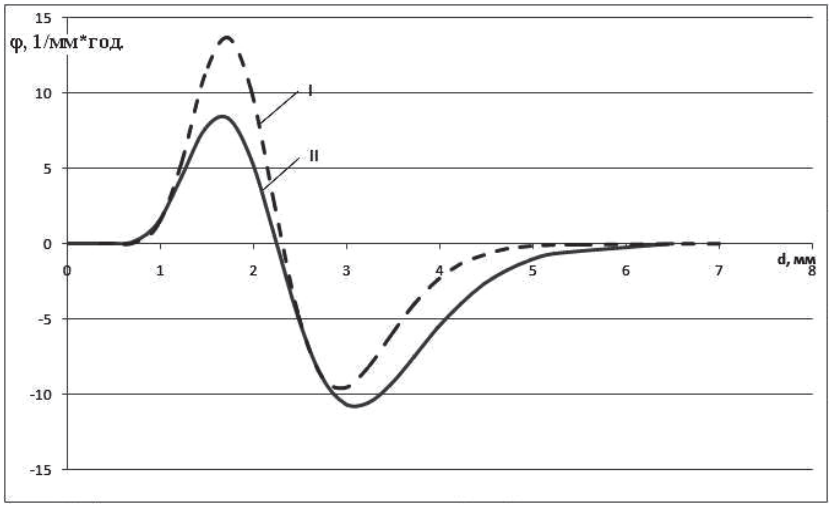

б)




в)




г)




д)

*а) динаміка зміни еквівалентного діаметру; б) динаміка масових розподілів гранул; в) апроксимація динаміки масових розподілів; г) порівняння експериментального та розрахункового масових розподілів із заданим розподіленням готового продукту, I – експериментальний, II – розрахунковий, III – заданий д) порівняння функцій джерела та стоку частинок в стаціонарному режимі, I - експериментальні , II – розрахункові*

**Рис. 3 - Результати експериментальних досліджень при одержанні гуміново-азотно-калійно-кальцієвих твердих композитів**

Аналіз результатів експериментів при одержанні двох інших типів гуміново-мінеральних композитів підтверджує положення фізичної моделі в цілому. Але з деяким відхиленням масового розподілення реального процесу в порівнянні з розрахунковим.

Для узагальнення вивчення процесу авторами запропоновано ввести функцію втрат якості Кожна характеристика процесу має своє цільове (номінальне) значення. Мета досліджень полягає в тому, щоб мінімізувати відхилення навколо цього номінального значення. Тагучі пропонує моделювати можливі відхилення від цього номінального значення за допомогою квадратичної функції втрат. Функція втрат Тагучі набуває вигляду [6]:

$L(y) = k\,(y - T)^2$

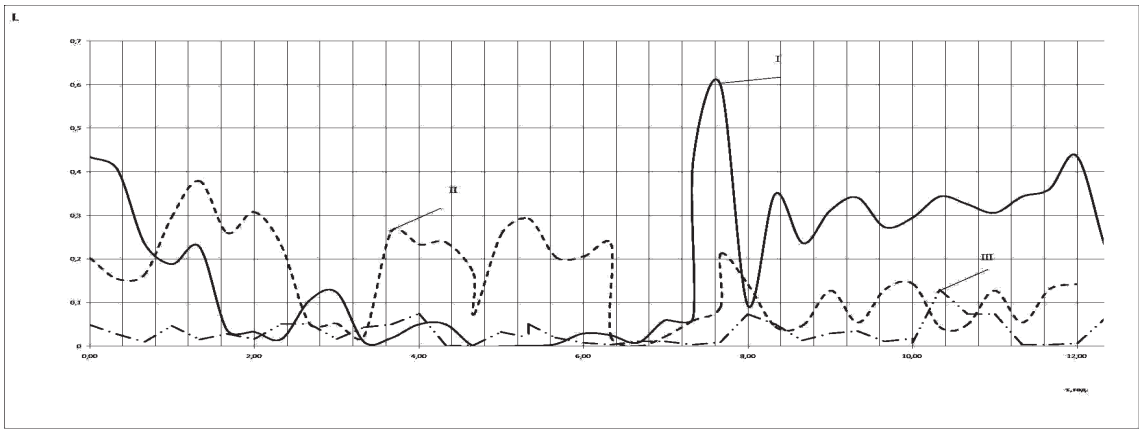
де *L(y)* — функція втрат; *y* — дійсне значення; *T* — цільове значення; *k* — коефіцієнт пропорційності.

Виходячи з викладеного вище, як функція потужності нових центрів грануляції, так і функція масового розподілення центрів грануляції залежать від параметрів z і n. Тому модифікована функція втрат якості набуває вигляду:

$$L = k_1(z_y - z_T)^2 + k_2(n_y - n_T)^2,$$

де $z_y$, $z_T$ — відповідно дійсне та цільове значення параметра z, $n_y$, $n_T$ — дійсне та цільове значення параметра n, $k_1$, $k_2$ — коефіцієнти впливу.

На рис. 4 наведена динаміка функції втрат якості при одержанні трьох типів гуміново-мінеральних композитів.




*I – гуміново-азотних; II – гуміново-азотно-кальцієвих; III – гуміново-азотно-калієво-кальцієвих*

**Рис. 4 – Динаміка модифікованої функції якості при утворенні гуміново-мінеральних композитів**

Найкращий якості гранульованого продукту відповідає L = 0. При збільшенні значення функції L якість дисперсного складу продукту суттєво погіршується.

**Висновки**

Запропонована математична модель адекватно описує безперервний процес пошарового утворення гуміново-мінеральних твердих композитів з різним хімічним складом та визначає дисперсний склад і потужність функції нових центрів грануляції і способи її реалізації за рахунок внутрішнього та зовнішнього джерел. Модифікована функція якості дозволяє визначити якісні характеристики процесу стосовно якості дисперсного складу готового продукту.

**Література**

1. Пат. 4465 Україна, МКП С05 G 1/00. Спосіб виготовлення гранульованих органомінеральних добрив. /Я.М. Заграй, Я.М. Корнієнко (Україна). – № 93121640; Заявл. 21.05.93; Опубл. 27.12.94, Бюл. №6 − 1. − 14 с.
2. Горовая А.Н., Орлов Д.С.,Щербенко О.В. Гуминовые вещества. Строение, функции, механизмы действия, протекторные свойства, экологическая роль – К.: Наукова думка, 1995 – 302 с.
3. Корнієнко Я.М., Заграй Я.М., Буджерак А.І. Засади техногенної безпеки в агропромисловому комплексі України // Наукові вісті НТУУ "КПІ" – 2001. − №3. − С. 129 – 135.
4. Тодес О.М., Каганович Ю.Я., Себалло В.А. и др. Обезвоживание растворов в кипящем слое. – М.: Металлургия, 1973. – 287с
5. Корнієнко Я.М. Математичне моделювання безрециклового процесу грануляції у псевдозрідженому шарі. // Наукові вісті НТУУ "КПІ" – 2000. − № 2. − С. 38 – 41.
6. Taguchi G. Taguchi on Robust Technology Development: Bringing Quality Engineering Upstream, ASME Press, New York. – 1993. – 293 p.