

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ  
ХІМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

УДК 628.5.66.002.08

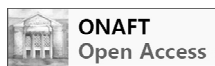
МОДЕЛЮВАННЯ СТОХАСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ГРАНУЛОУТВОРЕННЯ  
МІНЕРАЛЬНО-ГУМІНОВИХ ДОБРІВ У  
ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ  
MODELING OF STOCHASTIC MINERAL-HUMIC FERTILIZERS GRANULE  
FORMATION PROCESSES IN AERATED LAYER

Корнієнко Я.М., д-р техн. наук, проф., Сачок Р.В., канд. техн. наук, старший викладач  
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", м. Київ  
Korniienko Ia.M., Sachok R.V.  
National Technical University of Ukraine "Kyiv Politechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Copyright © 2016 by author and the journal "Scientific Works".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



*Розроблено математичну модель безперервного процесу гранулоутворення гуміново-мінеральних композитів із заданими властивостями в псевдозрідженому шарі з використанням моделі нечітких множин.*

*Робота проводилась на основі експериментальних досліджень процесу гранулоутворення гуміново-мінеральних твердих композитів при зневодненні водних розчинів на основі сульфату амонію на пілотній установці з псевдозрідженим шаром. Для дослідження стохастичного багатofакторного процесу, кожний з факторів якого впливає на інші й не завжди підлягає кількісному прогнозуванню про результатів дослідження було використано метод найменших квадратів та визнано найбільш доцільним застосувати закони нечіткої логіки з розробкою математичної моделі у інтегрованому середовищі MatLab. Математичне моделювання дасть можливість корегування різних факторів при їх неконтрольованих змінах.*

*Mathematical model of continuous granulation humic-mineral composites with desired properties in a fluidized bed using the model of fuzzy sets.*

*The work was based on experimental studies granulation process rubber-new solid-mineral composites with dehydration of aqueous solutions of ammonium sulfate based on pilot plant fluid bed. To study multivariate stochastic proc-su, one of the factors which affect the other and not always subject to the quantitative prediction of the re-sults of the study was the method of least squares and found the most appropriate law to apply fuzzy logic to the development of mathematical models in an integrated environment MatLab. Mathematical modeling will enable adjustment of various factors in their uncontrolled changes.*

**Ключові слова:** Псевдозрідження, гранулоутворення, добрива, кінетика.

**Keywords:** fluidization, granulation, fertilizer, kinetics.

Виробництво гуміново-мінеральних добрив при утилізації промислових відходів є важливою задачею для збереження екологічної рівноваги при інтенсивному способі землекористування.

Успішна протидія виснаженню ґрунтів пов'язана з розробкою нових видів комплексних добрив, які містять мінеральні поживні речовини, гумінові компоненти та розкислюючи домішки з пошаровим розподіленням їх по всьому об'єму гранульованого продукту.

На кафедрі машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв НТУУ «КПІ» було розроблено спосіб виробництва гранульованих гуміново-мінеральних добрив з водних розчинів на основі сульфату амонію зі змінним хімічним складом, який визначається агро-кліматичними умовами їх застосування та фізико-хімічними властивостями, що впливають з технічних умов до добрив [1]. Сутність технології полягає у зневодненні композитних розчинів на основі сульфату амонію в апараті з псевдозрідженим шаром з отриманням гранульованого продукту.

В процесі експлуатації пілотної установки було встановлено, що стійкість кінетики процесу залежить від багатьох технологічних факторів, зміну яких складно прогнозувати однозначно. Тому виникла необхідність у створенні алгоритму оцінки кінетики процесу та забезпечення адекватного керування їм за наявності відхилень стохастичного характеру, які зазвичай не піддаються кількісній оцінці.

## ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ХІМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Основна складність цієї задачі – в тому, що необхідно забезпечити не тільки необхідні вимоги до продукту, але й раціональні умови процесу масової кристалізації робочого розчину на поверхні гранул задля підтримання сталої кінетики процесу та отримання пошарової структури гранул.

Метою експериментальних досліджень було визначення закономірностей безперервного процесу утворення мінерально-гумінових добрив із заданими фізико-хімічними властивостями.

Для забезпечення умов фізичної моделі досліди проводились в грануляторі з псевдозрідженим шаром, який має форму комірки у вигляді паралелепіпеда, в нижній частині якого розташовано газорозподільний пристрій (ГРП).

В якості початкових центрів грануляції використовувались кристали сульфату амонію, або дрібні гранули. Температура нагрітого теплоносія на вході до гранулятора підтримувалась на рівні 160–220 °С, температура у псевдозрідженому шарі підтримувалась в межах – 80–102 °С, шляхом зміни витрат рідкої фази, яка за допомогою спеціальних пристроїв диспергувалася всередину псевдозрідженого шару.

Композитний розчин готувався на основі 40%(мас.) водяного розчину сульфату амонію з рН=6,5–7,6 з домішками гумінових речовин та  $K_2SO_4$ ,  $CaCO_3$ .

Коефіцієнт гранулоутворення визначається за виразом:

$$\psi = \frac{G_{\text{пр}}}{G_{\text{м}}} \cdot 100\% ,$$

де  $G_{\text{пр}}$  – масова продуктивність гранульованого продукту, кг/год;

$G_{\text{м}}$  – кількість матеріалу, що надходить до апарату з вихідним розчином за одиницю часу, кг/год.

Попередніми дослідями встановлено, що масове розподілення гранул в апараті описується гамма-розподіленням [2–4] в діапазоні зміни еквівалентного діаметра від 0,5 до 3,5 мм:

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

де  $z$ ,  $n$  – параметри гамма-розподілення;

Оцінка відповідності дисперсного складу продукту заданому визначалась як функція втрат якості Тагучі [5, 6]:

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

де  $y$  – дійсне значення;

$T$  – задане значення;

$k$  – коефіцієнт пропорційності.

Враховуючи те, що масовий розподіл частинок в апараті описується гамма-функцією, і залежить від параметрів розподілення  $n$  і  $z$ , ступінь відхилення від заданого буде визначатися різницею їх значень.

Для оцінки відповідності необхідно було виконати апроксимацію поточних масових розподілів гранульованого продукту. Для цього запропоновано для кожного моменту часу за даними ситового аналізу проводити апроксимацію масового розподілу, що описується гамма-функцією, за допомогою логарифмування у вигляді [3,4]:

$$\ln g = \ln z - \ln(n-1)! + (n-1) \ln D^* - z D^*$$

Лінеаризоване рівняння (1), розв'язане відносно діаметра, можна представити у вигляді:

$$\ln g = a_0 + a_1 \ln D^* + a_2 D^* ,$$

де  $a_0 = n \ln z - \ln(n-1)!$ ,  $a_1 = n-1$ ,  $a_2 = -z$ ,

з якого методом найменших квадратів визначають коефіцієнти гамма-розподілення  $n$  і  $z$ . Отже, задане масове розподілення з параметрами  $n_T$  і  $z_T$  запишеться:

$$g_T = \frac{z^{n_T}}{(n_T - 1)!} D^{*(n_T-1)} \cdot e^{-z_T D^*} .$$

Тоді як поточне масове розподілення гранул буде відрізнятися тільки значеннями коефіцієнтів  $n_Y$  і  $z_Y$ :

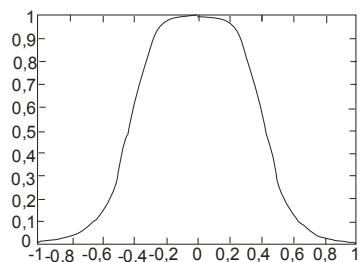
$$g_Y = \frac{z^{n_Y}}{(n_Y - 1)!} D^{*(n_Y-1)} \cdot e^{-z_Y D^*} .$$

Відповідно, отримаємо модифіковану функцію втрат якості дисперсного складу у вигляді:

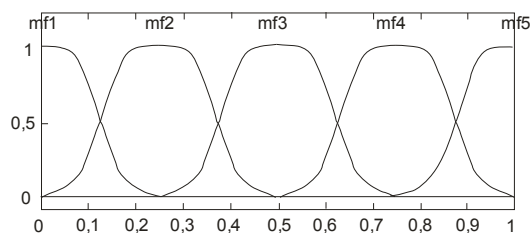
$$L = k_1 (z_Y - z_T)^2 + k_2 (n_Y - n_T)^2 ,$$

де  $z_Y$ ,  $z_T$ ,  $n_Y$ ,  $n_T$  – відповідно фактичні та задані значення параметрів  $\gamma$ -розподілення,  $k_1$ ,  $k_2$  – коефіцієнти впливу, де фактичні значення визначені за результатами експериментальних досліджень [5,6].

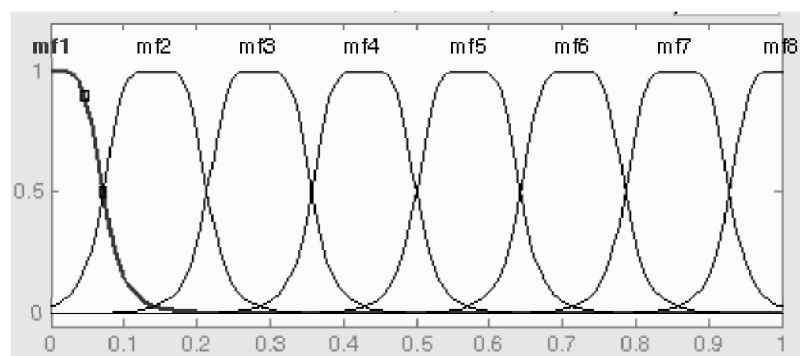
## ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ХІМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ



**Рис. 1 – Загальний вид дзвіноподібної функції належності**



**Рис. 2 – Розподіл функцій належності для змінних  $M_{ш}$ ,  $K_w$ ,  $T_g$ ,  $Q_p$ ,  $C_p$ ,  $H_{sh}$ ,  $T_{sh}$**  цю приналежності [6], наведену на рисунку 3.



**Рис. 3 – Розподіл функцій належності для змінних  $D_{еноч}$ ,  $D_{енр}$ , "n" і "z"**

ки отриманого продукту, рисунок 4.

Функція якості "L" враховує відхилення масового розподілення гранульованого продукту від заданого, коефіцієнт грануло утворення "Psi" визначається відношенням маси гранульованого продукту до маси сухих речовин, які надійшли з робочим розчином. Областю бажаних значень для цільових функцій є:  $L \rightarrow 0$ ,  $\Psi \rightarrow 0,99$  [5,6].

Основною умовою стійкої кінетики процесу утворення композитних добрив з пошаровою структурою є забезпечення стабільності загальної поверхні частинок в шарі  $f_{ш}$  та їх числа з урахуванням вивантаження гранульованого продукту та відновлення центрів грануляції за рахунок внутрішнього або зовнішнього рециркулю. Для досягнення цієї цілі необхідно розрахувати функцію потужності джерела нових центрів грануляції [3–5]:

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

Для стаціонарного процесу, коли  $\partial g / \partial \tau = 0$  рівняння (2) набуває вигляду:

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

Для стабілізації дисперсного складу в апараті при загальному вивантаженні розраховуємо потужність узагальненої функції джерела нових центрів грануляції, яка реалізується у вигляді зовнішнього та внутрішнього рециркулю [6]:

Метою роботи є створення математичної моделі, яка б враховувала вплив стохастичної зміни технологічних характеристик на стійкість кінетики процесу гранулоутворення та дисперсний склад гуміново-мінеральних твердих композитів.

Виходячи з того, що зміна ряду факторів носить стохастичний характер, для моделювання процесу запропоновано методи нечіткої логіки.

Сутність методу полягає у застосуванні нечітких множин і лінгвістичних змінних [5]. Для реалізації методу було обрано середовище MatLab із додатком нечітких множин FuzzyLogicToolbox.

Вхідні змінні моделі вибираються у вигляді функцій належності дзвіноподібної форми (*gbellmf*), рисунок 1.

Особливість цих функцій полягає в тому, що вони можуть змінювати не тільки свою форму, але й ширину ділянки з максимальним значенням, як показано на рисунку 1.

Налаштування моделі полягає у створенні бази правил та вибору відповідної кількості функцій належності за результатами проведених експериментальних досліджень.

Зокрема, для процесів одержання гуміново-мінеральних добрив для змінних  $M_{ш}$ ,  $K_w$ ,  $T_g$ ,  $Q_p$ ,  $C_p$ ,  $H_{sh}$ ,  $T_{sh}$ ,  $f_{sh}$  запропоновано типи функцій належності, наведені на рисунку 2.

Відповідно для змінних  $D_{еноч}$ ,  $D_{енр}$ ,  $n$  і  $z$  з урахуванням більшого ступеня їх варіативності запропоновано функції належності, наведені на рисунку 3.

Окрім того, створено базу правил, яка описує якісні залежності вихідних параметрів від вхідних. Структурна схема моделі процесу гранулоутворення гуміново-мінеральних добрив наведена на рисунку 4.

Модель складається з трьох модулів: I – змінні, що враховують технологічні параметри процесу, хімічний склад продукту тощо, II модуль – врахування особливостей кінетики та способу стабілізації дисперсного складу, III – якісні й кількісні характеристики, що характеризують ефективність процесу та якісні характеристики

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ХІМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

$$\varphi(D) = \varphi_{зов} + \varphi_{вн} \quad (4)$$

де  $\varphi_{зов}$  – потужність зовнішнього джерела, 1/(мм·год),

$\varphi_{вн}$  – потужність внутрішнього джерела, 1/(мм·год).

З рівняння (3) розраховуємо потужність розрахункової функції джерела і стоку гранул  $\varphi(D)$ , яка забезпечує стабілізацію дисперсного складу і порівнюємо з потужністю, визначеною з експерименту  $\varphi_{вн}(D)$ . Тоді потужність зовнішнього джерела (компенсаційної функції) визначиться за виразом:

$$\Delta\varphi = \varphi_{зов} = \varphi(D) - \varphi_{вн}(D) \quad (5)$$

Для розрахунку функції потужності джерела та стоку  $\varphi(D)$  і, відповідно, функції зовнішнього рециркулу необхідно встановити закон масового розподілення гранул у псевдозрідженому шарі.

Розрахунок масових витрат рециркулу проводиться за формулою за умови  $dM_{ш}/d\tau = \text{const}$ :

$$G_{рец} = G_{гр} \left( \frac{[D_e] - 2(D_{e2} - D_{e1})}{D_{e2}} \right)^3 \Delta q,$$

де  $G_{гр}$  – масова продуктивність за гранульованим продуктом, кг/год;

$[D_e]$  – заданий еквівалентний діаметр  $[D_e]=2,3$  мм;

$D_{e1}$  – початкове значення еквівалентного діаметру частинок в апараті в інтервалі часу  $\Delta\tau$ , год;

$D_{e2}$  – кінцеве значення еквівалентного діаметру частинок в апараті в інтервалі часу  $\Delta\tau$ , год;

$\Delta q$  – корегуючий коефіцієнт, що визначається, як  $\Delta q = \int_0^5 \Delta\varphi(d) dd$  для кожного хімічного складу рідкої фази

за попередніми дослідженнями.

Для досягнення поставленої мети блоки III модуля мають зворотні зв'язки з другим модулем.

На основі вищенаведених формул у блоці II і III безперервно за допомогою вбудованих функцій середовища MatLab обраховуються задане та поточне значення функції потужності нових центрів грануляції  $Fi(D)$  та розраховуються різниці між ними  $dFi(D)$ . В разі набуття функцією  $dFi(D)$  в діапазоні від 0–2,3 від'ємних значень (недостатня інтенсивність утворення нових центрів грануляції) необхідно вводити додатково в апарат нові центри грануляції із зовні. При значеннях  $dFi(D) > 0$  центри грануляції утворюються за рахунок подрібнення частини великих гранул – внутрішній рецикл. Наявність зворотнього зв'язку з попередніми блоками дозволяє визначити зміну відповідних параметрів блоку II та I.

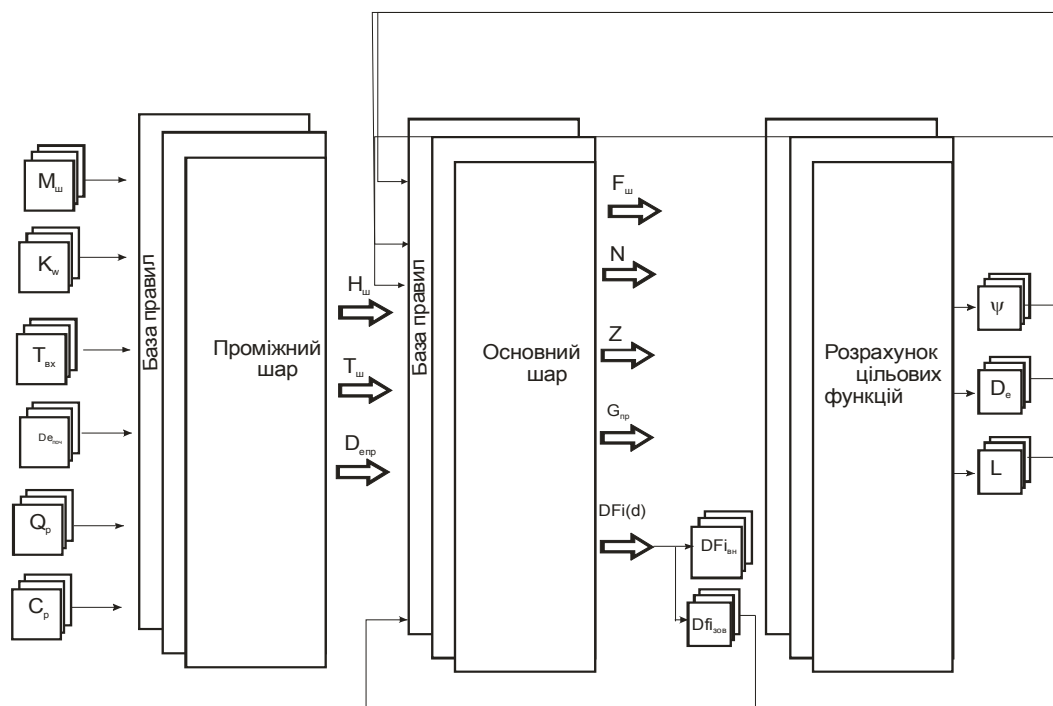


Рис. 5 – Структурна схема моделі процесу з використанням нечіткої логіки

**ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ  
ХІМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Таблиця 1 – Результати розрахунку моделі

№	Розрахункові величини							Експериментальні величини						
	$D_{en}$	n	z	n/z	dFi(d)	Psi	L	$D_e$	n	z	n/z	$\psi$	L	$\Delta$
1.	1,9	17	7,4	2,29	0,2	0,81	2,5	2,43	13	5,61	2,31	0,97	2,3	0,03
2.	2,2	19	8,41	2,3	0	0,97	0	2,35	12	5,1	2,35	0,97	0	0,34
3.	1,7	14	7,8	1,82	2,4	0,84	12,6	1,92	16	8,52	1,87	0,98	13,84	0,09
4.	2	17	7,65	2,2	0,17	0,89	2,28	2,26	12	4,66	2,57	0,97	2,6	0,12
5.	3	17	3,79	4,5	-3,958	0,89	12,6	2,52	14	5,55	2,52	0,98	12,02	0,13
6.	3,5	21	3,73	5,5	-4,305	0,81	12,8	2,71	13	5,12	2,53	0,97	15,22	0,07

Для розрахунків 1, 2 отримані незначні значення функції втрат якості  $0 \leq L \leq 2,5$  при цьому коефіцієнт гранулоутворення складає значення  $\psi \geq 0,98$ , а значення функції нових центрів гранулоутворення  $\Delta \leq 0,2$ , тобто, реалізоване за рахунок внутрішнього рециркулю, підтверджує положення фізичної моделі: заданий гранулометричний склад характеризується невеликими значеннями функції втрат якості.

Розрахунки 3,4 при високому коефіцієнті гранулоутворення  $\psi \geq 0,97$  показують значне відхилення гранулометричного складу від заданого –  $12,6 \leq L \leq 24$ , а значення функції  $2,17 \leq \Delta \leq 2,4$  обґрунтовують необхідність реалізації подальшого процесу при недостатній кількості нових центрів гранулоутворення.

Розрахунки 5,6 при задовільному коефіцієнті гранулоутворення також показують відхилення гранулометричного складу від заданого –  $12,6 \leq L \leq 12,8$  при значеннях функції нових центрів гранулоутворення –  $4,305 \leq \Delta \leq -2,93$ , тобто для цих параметрів необхідно введення зовнішнього рециркулю визначеного гранулометричного складу й маси [5].

Порівняння результатів, розрахованих на основі експериментальних даних дослідів з азото-кальцієво-гуміновими добривами, показує збіжність з результатами математичної моделі з середньою похибкою менше 13 %, що підтверджує адекватність математичної моделі, базованої на основі нечіткої логіки.

**Висновки.** Запропонована математична модель дозволяє визначити вплив вхідних змінних на основні технологічні параметри процесу, і, як наслідок, на ефективність процесу гранулювання і характеристики гранульованого продукту.

Це дасть змогу в умовах промислової реалізації технології виробництва гранульованих мінерально-гумінових добрив визначити ступінь дії системи автоматичного керування процесом в разі виникнення збурень внаслідок стохастичної зміни окремих технологічних параметрів процесу, а при форс мажорних ситуаціях оперативно вивести установку з робочого режиму і визначити порядок дій технічного персоналу, що суттєво зменшить енерговитрати та обсяги бракованої продукції.

Окрім того, теоретичні засади, покладені в основу запропонованої моделі, можуть служити основою для створення комплексного алгоритму системи керування складних багатofакторних процесів в дисперсному середовищі хаотичних структур із застосуванням сучасних інформаційних технологій.

### 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. Корнієнко Я.М. Математичне моделювання безрециклового процесу грануляції у псевдозрідженому шарі. // Наукові вісті НТУУ “КПІ” – 2000. - № 2. – С. 38–41.
3. Корнієнко Я. М. Особливості процесу гранулоутворення органомінеральних добрив у псевдозрідженому шарі – “Вісник НАУ”, №3, 2001 – с. 79–84.
4. Корнієнко Я.М. Ефективність процесу утворення багатошарових твердих композитів / Я.М. Корнієнко, Р.В. Сачок // Наукові праці. Одеська національна академія харчових технологій. – №32. – 2008, С. 97–99.
5. Kornienko Y. Modelling of multifactor processes while obtaining multilayer humic-mineral solid composites / Y. Kornienko, R. Sachok, O. Tsepka // Chemistry, Vol. 20, Iss. 3 (2011) p E19–E26.
6. Kornienko Y. Complex assessment of the efficiency of granulation process in dispersed systems / Y. Kornienko, R. Sachok // "Chemistry & chemical technology", vol.2, №3. – 2008, С. 217–220