

УДК 517.977.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/22>**Корнієнко Б.Я.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Нестерук А.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЦТВОМ ГРАНУЛЬОВАНИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

Проведено системний аналіз підходів до побудови систем управління виробництвом гранульованих мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі. Робота має на меті розробку оптимальної системи управління для забезпечення ефективного та стабільного виробництва гранульованих добрив у складному середовищі псевдозрідженого шару. У ході дослідження було визначено основний технологічний параметр, що впливає на якість та продуктивність процесу виготовлення мінеральних добрив – розмір частинок. Він залежить від властивостей використовуваних речовин, режиму процесу та інших факторів, що визначають характер взаємодії між фазами процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. Для побудови системи управління була використана математична модель балансу популяції в різних зонах гранулятора. Ця модель дозволила враховувати динаміку частинок та їх взаємодію у псевдозрідженому середовищі. Основним компонентом розробленої системи управління є MPC (Model Predictive Control) регулятор. MPC використовує математичну модель процесу для передбачення майбутнього стану системи та прийняття оптимальних рішень щодо управління. Цей регулятор був обраний через його здатність адаптуватися до змінних умов нелінійних систем та враховувати обмеження величини управління. Додатково була визначена передавальна функція системи на основі моделі, що дозволило провести оцінку ефективності розробленої системи з використанням MPC регулятора. Для створення системи використовуються пакети програмного забезпечення MatLab Simulink, MPC Designer і System Identification Toolbox. Ця робота відкриває можливості для покращення процесу виробництва гранульованих мінеральних добрив у складних умовах псевдозрідженого середовища, а саме управління за якістю кінцевої продукції – гранульованих мінеральних добрив, та може бути корисною для промислових підприємств, які займаються виробництвом гранульованих добрив та супутньої продукції.

Ключові слова: система управління, математична модель, гранулювання, псевдозріджений шар, мінеральні добрива.

Постановка проблеми. Процес грануляції частинок широко поширений в різних сегментах виробництва, в хімічній і фармацевтичній промисловості, оскільки значно покращує якість кінцевих продуктів за рахунок підвищення механічної стабільності частинок, захисту від мікроорганізмів і зовнішніх фізичних факторів, таких як надмірне тепло, вологість і вплив світла. Крім того, кращі умови обробки забезпечуються за рахунок збільшення розміру і щільності частинок. Дуже важлива стабільність режиму псевдозрідження під час операцій нанесення покриттів і гранулювання, що виконуються в псевдозрідженому шарі. При висушуванні виникають зони без активності, відбувається агломерація частинок, знижуються коефіцієнти тепло- і масопередачі, що може призвести до зупинки процесу на декілька хвилин. В екстремальних ситуаціях це може призвести

до повного руйнування шару. Вміст вологи та діаметр частинок є критичними параметрами, оскільки вони впливають на стабільність псевдозрідження, тому вони потребують як моніторингу, так і управління [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На виробництві найпоширенішим методом управління є контроль перепаду тиску [3-6]. Також для управління процесом гранулювання використовується метод управління споживання електроенергії системою змішування [7, 8]. Основними параметрами якості готової продукції є вологість і розмір гранул – відповідно, на основі цих параметрів реалізовано ряд систем управління [9-12]. На процес гранулювання в грануляторі великий вплив мають такі параметри: температура гранул, температура теплоносія і вологість гранул. Вологість гранул, температура теплоносія і темпера-

тура гранул тісно пов'язані між собою, тому що якщо температура теплоносія виходить за межі температурного діапазону, відбудеться надмірний нагрів гранул і критичне зниження вологості гранул. Для побудови системи управління процесом гранулювання в псевдозрідженому шарі запропоновано використовувати температуру теплоносія та температуру гранул [13–44].

Метою статті є створення системи управління виробництвом мінеральних добрив з метою зниження витрат енергоресурсів та підвищення продуктивності.

Виклад основного матеріалу.

Математична модель процесу грануляції в псевдозрідженому шарі.

При гранулюванні розчинів за допомогою дегідратації на перший план висувається вимога отримання продукту з певним гранулометричним складом. В цілому механізм росту гранул залежить від властивостей використовуваних речовин, режиму процесу та інших факторів, що визначають характер взаємодії між дисперсною рідкою і твердою фазами.

У нашому випадку численні дослідження підтвердили, що на стан готового продукту, основним показником якості якого є еквівалентний діаметр частинок, найбільше впливає температура псевдозрідженого шару, в якому вони формуються (рис. 1). У гранулятор з псевдозрідженим шаром 1 за допомогою виконавчого пристрою 2 подається розчин, а виконавчим пристроєм 3 – грануляційні частинки. Підігрітий теплоносій – повітря, подається знизу вгору. За допомогою виконавчого пристрою 4 вивантажується готовий продукт – гранули.

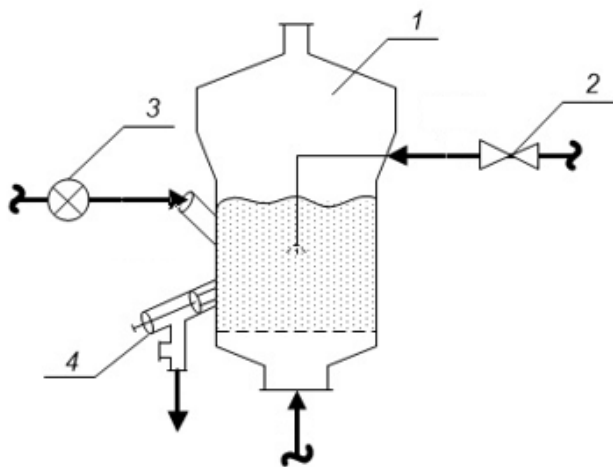


Рис. 1. Апарат для гранулювання термолабільних речовин в псевдозрідженому шарі: 1 – гранулятор, 2 – пристрій для введення вихідного розчину, 3 – пристрій для введення частинок; 4 – пристрій для вивантаження готової продукції

Через об'ємне змішування гранул псевдозріджений шар часто вважається повністю змішаним. Розчин розпилюється у верхній частині шару, а біля поверхні утворюється «активна» зона, де краплі осідають на гранулах і розчинник випаровується. Розподіл температури повітря, вимірний на обладнанні з псевдозрідженим шаром з верхнім розпиленням рідини за допомогою форсунки, показує наявність трьох областей у псевдозрідженому шарі. Виділяють наступні зони: зона змочування – біля розпилювального сопла у верхній частині шару, ізотермічна зона – біля стінок гранулятора і зона теплообміну – над розподільником гарячого повітря.

Гранулятор із псевдозрідженим шаром розглядається як два реактори, які обмінюються частинками (рис. 2).

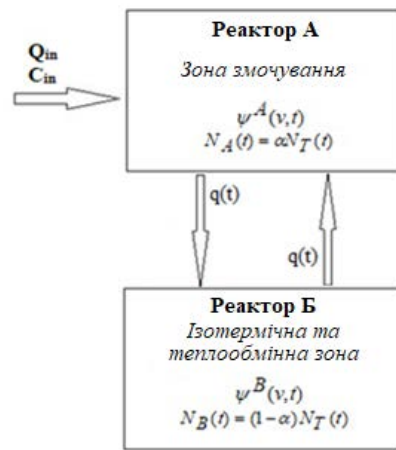


Рис. 2. Модель реактора

Реактор А відповідає зоні зволоження, а реактор Б – ізотермічній і теплообмінній зонам. Застосування рівняння балансу популяції до реакторів А і Б призвело до системи рівнянь (1):

$$\begin{cases} \frac{d\psi^A(v,t)}{dt} = \frac{q(t)}{V_A} \cdot [\psi^B(v,t) - \psi^A(v,t)] - \frac{\partial}{\partial v} \left[\frac{dv}{dt} \cdot \psi^A(v,t) \right] + F(v) - E(v) \\ \frac{d\psi^B(v,t)}{dt} = \frac{q(t)}{V_B} \cdot [\psi^A(v,t) - \psi^B(v,t)] \end{cases} \quad (1)$$

Перший і другий доданки в (1) відповідають обміну частинками між реакторами А і Б і зростанню шарів. В результаті дослідження математичної моделі була отримана система диференціальних рівнянь, що описують процес грануляції в псевдозрідженому шарі:

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_i^A}{dt} = \frac{q(t)}{V_A} \cdot (\Phi_i^B - \Phi_i^A) + D_i(t) + \sum_{j,k \in X}^{j \leq k} (1 - \frac{1}{2} \cdot \delta_{j,k}) \eta(v) \beta_{j,k} \cdot \Phi_j^A \cdot \Phi_k^A - \Phi_i^A \cdot \sum_{k=1}^N \beta_{j,k} \cdot \Phi_k^A - S \eta K_i \Phi_i^A \\ \frac{d\Phi_i^B}{dt} = \frac{q(t)}{V_B} \cdot (\Phi_i^A - \Phi_i^B) \end{cases} \quad (2)$$

де Φ_i^A – функція розподілу гранул в реакторі А; Φ_i^B – функція розподілу гранул в реакторі Б;

V_A – об’єм реактора А; V_B – об’єм реактора Б; $q(t)$ – швидкість обмінного потоку між реакторами А і Б; $D_i(t)$ – термін зростання дискретного нашарування; $\beta_{j,k}$ – функція агломерації; chi – частка, що належить до класу i ; i – клас крупності гранул; v – об’єм частинки; $[v_i; v_{i+1}]$ діапазон, де зосереджені гранули певного класу розміру.

Параметри κ і γ пов’язані з формою гранулометричного складу, а β_0 , який описує кінетику зміни гранулометричного складу, залежить від умов експлуатації.

Система управління процесом гранулювання мінеральних добрив з MPC регулятором

У принципах систем розширеного управління технологічними процесами основою управління є так зване управління на основі прогнозованої моделі (Model Predictive Control). Цей підхід почав розвиватися на початку 60-х років для управління процесами та обладнанням у нафтохімічному та енергетичному виробництві, для яких використання традиційних методів синтезу було надзвичайно складним через виняткову складність математичних моделей.

Алгоритм управління з прогнозованою моделлю можна представити у такому вигляді:

- Вимір поточного стану $\hat{x}[k]$, де k – поточний час.
- Знаходження послідовності оптимальних контрольних значень $u[i]$ для контрольного горизонту $N_c = k + C$, $k \leq N_c$, по всьому горизонту прогнозування $N_p = k + P$, яка мінімізує цільову функцію.
- Застосування лише першого контрольного значення $u[1]$ для управління, решта відкидається.
- Перехід до кроку 1 і повтор процедури в момент часу $k+1$.

У більшості випадків управління на основі MPC використовується для вирішення оптимальних завдань управління на верхньому рівні автоматизації, в системі виконання виробництва, без участі пристроїв управління нижнього рівня. Це пов’язано з тим, що обчислювальна потужність не має достатньої швидкості та об’єму пам’яті для обробки та зберігання інформації під час роботи алгоритму. Це твердження було вірно для програмованих логічних контролерів минулого століття, але сучасні пристрої забезпечені досить продуктивними процесорами і обсягами пам’яті. Завдяки цьому стає можливим застосовувати принципи управління з прогнозованою моделлю на нижчому рівні та здійснювати оперативний контроль в режимі реального часу в оптимальних режимах. У цьому випадку структуру регулятора MPC можна представити так (рис. 3).

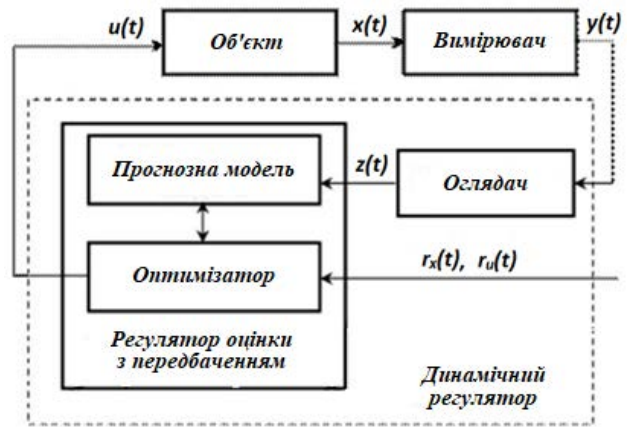


Рис. 3. Структура регулятора MPC

За аналогією з ПІД-регулятором регулятор MPC може працювати за схемою «один вхід – один вихід» (SISO).

Відповідно до наведеного алгоритму основними налаштуваннями регулятора будуть:

- N_p – горизонт прогнозу.
- N_c – горизонт управління.
- T_t – час одного циклу перерахунку алгоритму та знаходження оптимальних значень управління, тобто час, протягом якого буде виконуватися алгоритм регулятора.

При використанні MPC регулятора необхідно враховувати різні обмеження. У наведеному вище алгоритмі вибір горизонту прогнозу впливає на час розрахунку послідовності керуючих впливів разом із чисельними алгоритмами оптимізації. Занадто далекий прогноз і складність обчислення оптимальних значень призводять до збільшення обчислень на кожному такті і можуть вимагати багато часу ЦП.

Кожен параметр N_p , N_c , T_t впливає на якість регулювання, швидкість розрахунку оптимальних управлінь і чутливість системи управління. Критеріями вибору є мінімізація квадратичної похибки та розрахункова швидкість пошуку оптимального варіанту управління. За інших рівних умов перевагу слід віддавати комбінаціям параметрів з найменшим часом обчислення алгоритму.

Розглянемо контрольне завдання з лінійною моделлю та квадратичним функціоналом. Нехай об’єкт управління описується лінійною системою диференціальних рівнянь виду:

$$\dot{x}' = Ax + Bu \tag{3}$$

$$y = Cx + Du \tag{4}$$

У (3) A – матриця розмірності $n \times n$, B – матриця розмірності $n \times m$, C – матриця розмірності $r \times n$.

Для того, щоб оцінити якість процесів управління, необхідно ввести квадратичний функціонал:

$$J = \int_0^{\infty} (y^T R y + \lambda^2 u^T Q u) dt \tag{5}$$

У (5) y і u є функціями t , $R \in r \times r$ і $Q \in m \times m$ позитивно визначеними симетричними квадратними матрицями; λ – постійний позитивний коефіцієнт.

Реалізація системи управління процесом гранулювання мінеральних добрив в пакеті MATLAB

На сьогодні математичне моделювання за допомогою програмних засобів набуло належної популярності та інтенсивно розвивається як передовий науковий напрямок на стику математики та інформатики. Серед ряду сучасних систем комп'ютерної математики виділяється математична система MATLAB. Його матрична орієнтація та пакет розширення Simulink сприяють популярності цієї системи. Вони надають зручні та прості інструменти, включаючи візуальне та об'єктно-орієнтоване програмування для моделювання лінійних і нелінійних динамічних систем, а також багато інших системних пакетів. Структура MATLAB, крім основи – системи MATLAB + Simulink, містить великі групи пакетів прикладних програм.

Для отримання передатної функції моделі було вирішено використовувати розширення System Identification. Пакет System Identification Toolbox системи MATLAB містить інструменти для створення математичних моделей лінійних динамічних об'єктів на основі спостережуваних вхідних і вихідних даних. Він має зручний графічний інтерфейс, який дозволяє впорядковувати дані та створювати моделі.

Так, за результатами роботи System Identification Toolbox в системі MATLAB сформовано таку передаточну функцію моделі:

$$W = \frac{-0.09715s + 0.2277}{s^2 + 0.2636s + 0.1069} \quad (6)$$

Щоб створити реальні чи складні моделі простору станів або перетворити моделі динамічної системи у форму моделі простору станів, необхідно використати команду ss у пакеті Control System Toolbox.

Модель простору станів – це математичне представлення фізичної системи як набору вхідів, виходів і змінних стану, пов'язаних диференціальними рівняннями першого порядку. Змінні стану визначають значення вихідних змінних. Об'єкт моделі ss може представляти моделі простору стану SISO або MIMO в безперервному або дискретному часі.

Для цього ми ініціалізуємо функцію передачі в MATLAB і викликаємо відповідну команду для обчислення матриць A , B , C і D , які використовуються в (3) і (4).

Для отримання графіка перехідної характеристики з MPC регулятором використовувався пакет

MPC Designer системи MATLAB. При експорті цієї перехідної характеристики в пакет Simulink отримано графік роботи гранулятора з MPC регулятором (позначено синім кольором) і без нього (позначено жовтим кольором):

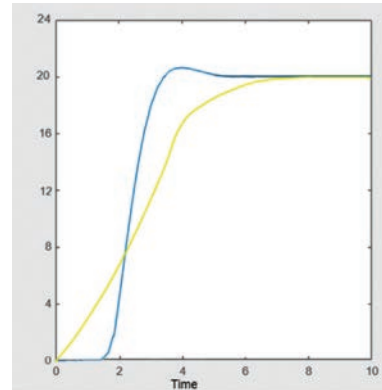


Рис. 4. Графік з використанням контролера MPC

З цього рисунку видно, що з MPC регулятором система працює швидше, тому цей регулятор можна використовувати в системі управління виробництвом мінеральних добрив.

Висновки. Розроблено систему управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром з MPC регулятором. Для створення системи управління використано математичну модель балансу популяції гранул у різних зонах гранулятора. Визначено передавальну функцію і на її основі оцінено створену систему за допомогою MPC регулятора. Впровадження системи управління з MPC регулятором дозволило значно скоротити (за 5,5 с замість 8 с) час виходу гранулятора з псевдозрідженим шаром до заданого рівня гранулометричного складу Φ_d .

Основною перевагою підходу MPC, що зумовлює його успішне використання в практиці побудови та експлуатації систем управління, є відносна простота базової схеми формування зворотного зв'язку в поєднанні з високими адаптивними властивостями. Остання обставина дозволяє управляти об'єктами зі складною структурою, що включають нелінійності, оптимізувати процеси в режимі реального часу в межах керуючих і керованих змінних, враховувати невизначеності завдання об'єктів і збурення. Крім того, можливе врахування транспортної затримки, враховуючи зміну критерію якості під час процесу та відмови датчиків вимірювальної системи.

Для створення системи також використовуються пакети програмного забезпечення MatLab Simulink, MPC Designer і System Identification Toolbox.

Список літератури:

1. Lipsanen T., Närvänen T., Räikkönen H., Antikainen O., Yliruusi J. Particle size, moisture, and fluidization variations described by indirect in-line physical measurements of fluid bed granulation. *AAPS PharmSciTech*. 2008. № 9. 2008. Pp. 1070-1077.
2. Lipsanen T. Process analytical technology approach on fluid bed granulation and drying. Identifying Critical Relationships and Constructing the Design Space. *Faculty of Pharmacy of the University of Helsinki*. Finland, 2008, 51p.
3. Silva C.A.M., Parise M.R., Silva F.V., Taranto O.P. Control of fluidized bed coating particles using Gaussian spectral pressure distribution. *Powder Technology*. 2011. № 212. Pp. 445-458.
4. el Mafadi S., Hayert M., Poncelet D. Fluidization control in Wuster coating process. *Hemijska Industrija*. 2003. №57. Pp. 641-644.
5. Poncelet D., Prata A.S., el Mafadi S., Boilleraux L. Optimisation and process control of fluid bed coating. *17th International Conference on Bioencapsulation*. Groningen, Netherlands, September 24-26, 2009.
6. Maudhuit A., Boillereaux L., el Mafadi S., Poncelet D. Development of process-control for coating in fluid bed. *18th International Conference on Bioencapsulation*, Porto, Portugal, October 1-2, 2010.
7. Terashita K., Watano S., Miyanami K. Determination of end-point by frequency analysis of power consumption in agitation granulation. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*. 1990. № 38. Pp. 3120-3123.
8. Watano S., Tanaka T., Miyanami K. A method for process monitoring and determination of operational end-point of consumption in agitation granulation. *Advanced Powder Technology*. 1995. № 6. Pp. 91-102.
9. Watano S., Takashima H., Miyanami K. Scale-up of agitation fluidized bed granulation by neural network. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*. 1997. №45. Pp. 1193-1197.
10. Nieuwmeyer F.J.S., Damen M., Gerich A., Rusmini F., van der K., Maarschalk V., Vromans H. Granule characterization during fluid bed drying by development of a near infrared method to determine water content and median granule size. *Pharmaceutical Research*. 2007. № 24. Pp. 1854-1861.
11. Burggraef A., van den Kerkhof T., Hellings M., Remon J.P., Vervaet C., de Beer T. Evaluation of in-line spatial filter velocimetry as PAT monitoring tool for particle growth during fluid bed granulation. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. 2010. № 76. Pp. 138-146.
12. Huang J., Goolcharran C., Utz J., Hernandez-abad P., Ghosh K., Nagi A. A PAT Approach to enhance process understanding of fluid bed granulation using inline particle size characterization and multivariate analysis. *Journal Pharmaceutical Innovation*. 2010. № 5. Pp. 58-68.
13. Korniyenko B., Ladieva L., Galata L. Control system for the production of mineral fertilizers in a granulator with a fluidized bed. *ATIT 2020 – Proceedings: 2020 2nd IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory*. 2020. № 9349344. Pp. 307-310.
14. Корнієнко Б.Я. Інформаційні технології оптимального управління виробництвом мінеральних добрив. Київ. 2014. 288 с.
15. Korniyenko B.Y. The two phase model of formation of mineral fertilizers in the fluidized-bed granulator. *The Advanced Science Journal*. 2013. № 4. Pp. 41-44.
16. Корнієнко Б.Я. Двохфазна 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.
17. Корнієнко Б.Я. Математичне моделювання динаміки процесів переносу при зневодненні та гранулюванні у псевдозрідженому шарі. *Науковий журнал «Вісник Національного авіаційного університету»*. 2012. № 4(53). С. 84-90.
18. Korniyenko B.Y. Modeling of transport processes in disperse systems. *The Advanced Science Journal*. 2013. № 1. Pp. 7-10.
19. Корнієнко Б.Я. Мінеральні добрива. Двохфазна модель утворення в грануляторі із псевдозрідженим шаром. *Хімічна промисловість України*. 2013. № 1. С. 39-43.
20. Корнієнко Б.Я., Ладієва Л.Р., Снігур О.В. Гранулювання у псевдозрідженому шарі. Дослідження детермінованого хаосу процесу. *Хімічна промисловість України*. 2013. № 2. С. 20-23.
21. Korniyenko B.Y. Research modes of a fluidized bed granulator. *The Advanced Science Journal*. 2013. № 5. Pp. 12-15.
22. Корнієнко Б.Я. Ідентифікація процесу гранулювання мінеральних добрив у апараті з псевдозрідженим шаром. *Наукоємні технології*. 2013. № 3(19). С. 280-284.
23. Korniyenko B.Y., Osipa L. Identification of the granulation process in the fluidized bed. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. № 13(14). Pp. 4365-4370.
24. Korniyenko B., Ladieva L. Mathematical Modeling Dynamics of the Process Dehydration and Granulation in the Fluidized Bed. *Advances in Intelligent Systems and Computing. 1247 AISC*. 2021. Pp. 18-30.

25. Korniyenko B., Ladieva L., Galata L. Control system for the production of mineral fertilizers in a granulator with a fluidized bed. *2020 2nd IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory*. 2020. № 9349344. Pp. 307-310.
26. Korniyenko B.Y., Borzenkova S.V., Ladieva L.R. Research of three-phase mathematical model of dehydration and granulation process in the fluidized bed. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. № 14(12). Pp. 2329-2332.
27. Korniyenko B.Y., Ladieva L.R. Mathematical modeling dynamics of the process dehydration and granulation in the fluidized bed. *Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту*. Херсон. 2019. Pp. 86-88.
28. Корнієнко Б.Я. Мінеральні добрива. Оптимізація процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. *Хімічна промисловість України*. 2013. № 4. С. 69-73.
29. Korniyenko B.Y. Static and dynamic characteristics of transport processes in disperse systems. *Наукоємні технології*. 2013. № 2(18). Pp. 166-170.
30. Корнієнко Б.Я. Мінеральні добрива. Статична оптимізація процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. *Хімічна промисловість України*. 2013. № 5. С. 36-40.
31. Корнієнко Б.Я. Ідентифікація процесу гранулювання мінеральних добрив у апараті з псевдозрідженим шаром. *Наукоємні технології*. 2013. № 3(19). С. 280-284.
32. Корнієнко Б.Я. Задачі оптимізації зневоднення та гранулювання мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*. 2014. № 1(12). С. 28-31.
33. Korniyenko Y.M., Liubeka A.M., Sachok R.V., Korniyenko B.Y. Modeling of heat exchangement in fluidized bed with mechanical liquid distribution. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. № 14(12). Pp. 2203-2210.
34. Korniyenko B., Galata L., Ladieva L. Security Estimation of the Simulation Polygon for the Protection of Critical Information Resources. *CEUR Workshop Proceedings, Selected Papers of the XVIII International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Security" (ITS 2018)*. Kyiv, Ukraine. 2018. № 2318. Pp. 176-187.
35. Корнієнко Б.Я. Дослідження моделі взаємодії відкритих систем з погляду інформаційної безпеки. *Наукоємні технології*. 2012. № 3(15). С. 83-89.
36. Korniyenko B., Yudin O., Novizkij E. Open systems interconnection model investigation from the viewpoint of information security. *The Advanced Science Journal*. 2013. № 8. Pp. 53-56.
37. Zhulynskiy A.A., Ladieva L.R., Korniyenko B.Y. Parametric identification of the process of contact membrane distillation. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences Volume 14*. 2019. № 17. Pp. 3108-3112.
38. Bieliatynskiy A., Osipa L., Korniyenko B. Water-saving processes control of an airport. *Paper presented at the MATEC Web of Conferences*. 2018. № 239.
39. Корнієнко Б. Я., Юдін О. К., Снігур О. С. Безпека аутентифікації у web-ресурсах. *Захист інформації*. 2012. № 1 (54). С. 20-25. doi.org/10.18372/2410-7840.14.2056 (ukr)
40. Корнієнко Б. Я., Галата Л. П. Дослідження імітаційного полігону захисту критичних інформаційних ресурсів методом IRISK. *Модельовання та інформаційні технології*. 2018. №83. С. 34-41.
41. Корнієнко Б. Я., Галата Л. П. Побудова та тестування імітаційного полігону захисту критичних інформаційних ресурсів. *Наукоємні технології*. 2017. № 4 (36). С. 316-322. doi.org/10.18372/2310-5461.36.12229.
42. Korniyenko Y.M., Haidai S.S., Sachok R.V., Liubeka A.M., Korniyenko B.Y. Increasing of the heat and mass transfer processes efficiency with the application of non-uniform fluidization. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. № 15(7). Pp. 890-900.
43. Korniyenko B., Korniyenko Y., Haidai S., Liubeka A., Hulienko S. Conditions of Non-uniform Fluidization in an Autooscillating Mode. *Advances in Computer Science for Engineering and Manufacturing. ISEM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. № 463. Pp. 14-27.
44. Korniyenko B., Korniyenko Y., Haidai S., Liubeka A. The Heat Exchange in the Process of Granulation with Non-uniform Fluidization. *Advances in Computer Science for Engineering and Manufacturing. ISEM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. № 463. Pp. 28-37

Korniyenko B.Ya., Nesteruk A.O. CONTROL SYSTEM FOR THE PRODUCTION OF GRANULAR MINERAL FERTILIZERS IN A FLUIDIZED BED

A systematic analysis of approaches to the construction of a control system for the production of granular mineral fertilizers in a fluidized bed was carried out. The work aims to develop an optimal control system to ensure efficient and stable production of granular fertilizers in a complex fluidized bed environment. In the

course of the research, the main technological parameter affecting the quality and productivity of the mineral fertilizer manufacturing process was determined - particle size. It depends on the properties of the substances used, the process mode and other factors, including the nature of the interaction between the phases of the granulation process in the fluidized bed. A mathematical model of population balance in different zones of the granulator was used to build the control system. This model made it possible to take into account the dynamics of particles and their interaction in a fluidized medium. The main component of the developed control system is the MPC (Model Predictive Control) controller. MPC uses a mathematical process model to predict the future state of the system and make optimal control decisions. This controller was chosen because of its ability to adapt to the changing conditions of nonlinear systems and to account for control quantity limitations. In addition, the transfer function of the system was determined based on the model, which made it possible to evaluate the efficiency of the developed system using the MPC regulator. The software packages MatLab Simulink, MPC Designer and System Identification Toolbox are used to create the system. This work opens up possibilities for improving the process of production of granular mineral fertilizers in complex conditions of a fluidized environment, namely, quality control of the final product - granular mineral fertilizers, and may be useful for industrial enterprises engaged in the production of granular fertilizers and related products.

Key words: control system, mathematical model, granulation, fluidized bed, mineral fertilizers.