

УДК 681.51:517.977.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.1/14>

Корнієнко Б.Я.

<https://orcid.org/0000-0002-2521-0878>

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Ладієва Л.Р.

<https://orcid.org/0000-0002-1706-0072>

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Корнієнко Я.М.

<https://orcid.org/0000-0002-3031-6212>

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Нестерук А.О.

<https://orcid.org/0000-0002-1563-7245>

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Савіна О.О.

<https://orcid.org/0009-0006-8972-4356>

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЦТВОМ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ У ГРАНУЛЯТОРІ ІЗ ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ ІЗ НЕЧІТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ

У статті розроблено систему управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром із нечітким регулятором. Наведені основні переваги виробництва мінеральних добрив у грануляторі із псевдозрідженим шаром. Визначено основні характеристики готового продукту – гранулометричний склад та вологовміст гранул. Для створення системи управління використовувалась математична модель розподілу кількості гранул за вологовмістом та розміром. Одержані перехідна характеристика функції розподілу кількості частинок та розподіл кількості частинок за вологовмістом та розміром. Наведено теоретичні засади побудови системи управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром із нечітким регулятором. Розглянуто загальну структуру нечіткого регулятора, до складу якої входять блок фазифікації, база знань, блок прийняття рішень і блок дефазифікації. Функцією блоку фазифікації є перетворення значень, отриманих на виході об'єкта управління, у нечіткі значення, що описуються лінгвістичними змінними, заданими в базі знань. На основі нечітких умовних правил, закладених у базу знань, блок прийняття рішень формує керуючі впливи з нечітких вхідних даних, причому ці впливи також подаються в нечіткій формі. Подальше перетворення результатів роботи цього блоку в чіткі значення здійснює блок дефазифікації, після чого вони можуть бути використані для управління об'єктами. Таким чином, нечітку систему доцільно застосовувати як схему управління. Для створеної системи визначено передавальну функцію та на її основі з використанням нечіткого регулятора виконано оцінку її роботи. Реалізація системи управління з нечітким регулятором дозволило значно збільшити швидкість виходу гранулятора із псевдозрідженим шаром на заданий рівень гранулометричного складу. Для створення системи також використовуються пакети Fuzzy Logic Toolbox та System Identification Toolbox програмного забезпечення MatLab.

Ключові слова: система управління, мінеральні добрива, гранулятор з псевдозрідженим шаром, нечіткий регулятор, математична модель.

© Корнієнко Б.Я., Ладієва Л.Р., Корнієнко Я.М. та ін., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0



Постановка проблеми: Комплексні гранульовані добрива належать до найбільш ефективних видів добрив, що використовуються в сільському господарстві. Вони характеризуються зручністю розподілу та внесення, стійкістю до впливу вітру і води, а також високим ступенем засвоєння різними рослинними культурами.

Гранулювання мінеральних добрив у псевдорозрідженому шарі є ефективним рішенням, оскільки за умови правильної побудови моделі та реалізації системи управління цей метод дає можливість формувати гранули необхідного розміру, отримувати добрива з заданою вологістю та змінювати їх склад відповідно до виробничих потреб. Для реалізації системи управління може бути використано значну кількість математичних моделей.

У зв'язку з цим виникає потреба в розробці математичної моделі процесу гранулювання у псевдорозрідженому шарі та реалізації системи управління процесом виробництва мінеральних добрив.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процес гранулювання у псевдорозрідженому шарі може описуватися на кількох рівнях абстракції, причому вибір рівня визначається тим, на яких саме явищах зосереджене дослідження. Найбільш деталізований підхід пов'язаний з мікроскопічним масштабом, де аналізується поведінка окремої частинки та враховується її взаємодія з рідиною, елементами обладнання і сусідніми частинками [1-4]. Менш деталізований опис відповідає мезомасштабу, в межах якого частинки не розглядаються окремо, а групуються в класи за спільними характеристиками. Для кожного такого класу приймається однаковість властивостей і характеру динаміки. Найбільш узагальнений опис реалізується на макроскопічному рівні, де окремі частинки вже не виділяються, а стан шару визначається через інтегральні характеристики всієї їх сукупності. Для кожного з наведених рівнів застосовуються власні підходи до моделювання. Для мікроскопічного масштабу пропонується використовувати модель гідродинаміки,

для мезомасштабу – модель балансу, тоді як макроскопічний масштаб може бути поданий методом моментів або моделлю Лагранжа-Ейлера [5]. Крім того, для задач побудови інформаційної технології управління процесом гранулювання у псевдорозрідженому шарі розглядаються поєднана модель балансу-гідродинаміки та багатокамерна модель балансу [6].

Розглянуто основні підходи до управління режимами псевдорозрідження під час процесів нанесення покриттів і гранулювання в псевдорозрідженому шарі. Розвиток систем управління гранулюванням у псевдорозрідженому шарі повинен забезпечити роботу в стабільному режимі псевдорозрідження, що посилює тепло- і масообмін, а також задану якість готового продукту (гранулометричний склад, низький вологовміст та хороша сипучість) [7-9]. Для управління режимами псевдорозрідження використовується аналіз сигналу коливання тиску [10-12]. Для управління гранулометричним складом застосовуються методи ближньої інфрачервоної спектроскопії та вимірювання відбиття сфокусованого променя [13-16]. Для управління вологовмістом гранул розглядаються методи акустичної емісії, мікрохвильового резонансу і електроємнісна томографія [17-20]. На основі контролю температури теплоносія та температури гранул створено систему управління процесом гранулювання у псевдорозрідженому шарі [21-31].

Постановка завдання. Метою статті є розробка системи управління виробництвом мінеральних добрив в грануляторі з псевдорозрідженим шаром на основі математичної моделі розподілу кількості гранул за вологовмістом та розміром і нечіткого регулятора.

Виклад основного матеріалу. Гранульовані мінеральні добрива – це сільськогосподарські засоби підживлення рослин, які виготовляють у формі кульок, грудок або паличок. Для їх виробництва використовують органічні, мінеральні або комбіновані компоненти. При внесенні гранульованих добрив вода повільно просочується в ґрунт і поживні речовини вивільнюються.



Рис. 1. Гранульовані мінеральні добрива

Розмір гранул зазвичай лежить в межах від 1,5 до 5 мм (рис. 1). Проте головним аспектом є склад компонентів, з яких сформовано добриво, а також вміст вологості в ньому.

Гранулювання належить до найпоширеніших способів виготовлення мінеральних добрив. Одержання твердих частинок із рідкого вихідного матеріалу, зокрема розчинів, емульсій і суспензій, може здійснюватися за допомогою кристалізації, гранулювання або сушіння розпиленням (рис. 2). У межах цієї схеми розчин надходить до гранулятора 1 із псевдозрідженим шаром через виконавчий пристрій 2, тоді як через виконавчий пристрій 3 вводяться центри грануляції. Рух нагрітого теплоносія, тобто повітря, організовано знизу вгору. Після завершення процесу готовий продукт у вигляді гранул вивантажується за допомогою виконавчого пристрою 4.

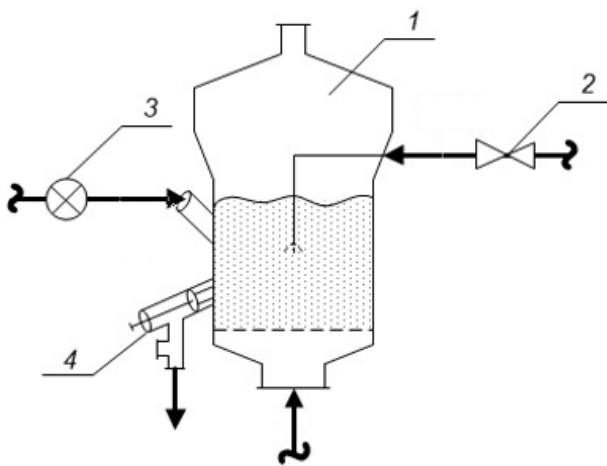


Рис. 2. Апарат для гранулювання термолабільних речовин у псевдозрідженому шарі: 1 – гранулятор, 2 – пристрій для введення вихідного розчину, 3 – пристрій для введення частинок; 4 – пристрій для вивантаження готового продукту.

Математична модель процесу гранулювання мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі

Для опису процесу сушіння дисперсних матеріалів у псевдозрідженому шарі наведено рівняння, які в загальному вигляді враховують не лише власне сушіння і перемішування частинок матеріалу, а й додаткові ефекти, що супроводжують зневоднення та гранулювання в псевдозрідженому шарі.

У випадку, коли процес сушіння відбувається в другому періоді, матеріал практично миттєво нагрівається до температури мокрого термометра. При цьому теплоносії залишає шар з температурою, що дорівнює середній температурі матеріалу. Якщо аналіз виконувати в багатови-

мірному просторі, координатами якого виступають вміст вологи, розмір частинок і три просторові координати частинки, то з'являється можливість врахувати кінцеву швидкість переміщення частинок у просторі апарату, вплив змінного дисперсного складу матеріалу, кінетику процесу сушіння частинок, а також стирання, винесення і сепарацію частинок у псевдозрідженому шарі.

Як невідому функцію, для якої записується рівняння, приймають щільність розподілу матеріалу $\rho(r, \omega, R, \tau)$, тобто частку матеріалу, що перебуває в певній точці простору апарату при заданому значенні радіус-вектора r , характеризується певним вмістом вологи ω , радіусом R і часом перебування τ . Тоді загальне рівняння для $\rho(r, \omega, R, \tau)$ можна трактувати як матеріальний баланс частинок матеріалу в елементарному обсязі dV розглянутого багатовимірного простору [32].

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = \text{div}(\rho \bar{v}) + \text{div}(-D_T \text{grad} \rho) - \frac{\partial \rho}{\partial \omega} \frac{d\omega}{d\tau} - \frac{\partial \rho}{\partial R} \frac{dR}{d\tau} \quad (1)$$

де D_T – коефіцієнт дифузійного перемішування.

Згідно з рівнянням (1) швидкість зміни щільності розподілу частинок в будь-якій точці псевдозрідженого шару визначається переміщенням матеріалу в просторі, тобто переходом потоку частинок матеріалу з однієї точки в іншу внаслідок вимушеного спрямованого руху (перше, конвективне доданок правої частини рівняння), перемішуванням частинок згідно з прийнятим дифузійним механізмом від більшого вмісту вологи до меншого внаслідок процесу сушіння (третій доданок) і переходом частинок з однієї фракції в іншу (дрібнішу) внаслідок їх стирання один про одного і про стінки апарату (останнє доданок).

Оскільки швидкість спрямованого руху дисперсного матеріалу для часток різного розміру може відрізнятися та складно піддаватися точному визначенню, під час аналізу процесів у псевдозріджених шарах доцільно використовувати так звану константу (коефіцієнт) вивантаження K_r . Для монодисперсного матеріалу ця константа записується у вигляді:

$$K_r = \frac{\int \Phi_{in}(\omega, \tau) d\omega}{\int \rho(\omega, \tau) d\omega} \quad (2)$$

де $\Phi_{in}(\omega, \tau)$ – розподіл вихідного матеріалу з вмісту вологи.

Швидкість зменшення розміру частинок dR/dt , як і коефіцієнт дифузійного перемішування D_T , значною мірою залежить від гідродинамічної обстановки у псевдозрідженому шарі та від меха-

нічних властивостей частинок матеріалу. В загальному випадку для конкретних умов і матеріалів значення dR/dt найбільш достовірно встановлюється експериментальним шляхом.

Швидкість сушіння частинок у найпростішому випадку, коли процес відбувається в межах одного періоду сталої швидкості, може бути подана у формі:

$$\frac{d\omega}{d\tau} = N = \frac{cQ_2(T_0 - T_M) - Q_H}{r_c \rho_T V_T \int \rho(\omega, \tau) d\omega} \quad (3)$$

де додатково приймається, що сушильний агент під час проходження через псевдозріджений шар достатньої висоти охолоджується до температури мокрого термометра; інтегрування в знаменнику ведеться у всьому можливому інтервалі вмісту вологи матеріалу від вихідного до рівноважного; c – питома теплоємність теплоносія; Q_2 – витрата теплоносія; Q_H – теплота миттєвого нагрівання вологого матеріалу до температури T_M ; T_0 – початкова температура теплоносія, К; r_c – теплота пароутворення; V_T – обсяг частки, m^3 ; ρ_T – щільність сухої частинки, kg/m^3 .

Якщо сушіння окремої частинки відбувається в послідовних періодах постійної та спадної швидкості, то рівняння (3) перестає бути справедливим, оскільки деяка частина частинок, що перебувають у шарі досить довго, сушитися в періоді спадної швидкості і температура таких частинок вище T_M , отже, і температура сушильного агента на виході з псевдозрідженого шару. Швидкість сушіння тих частинок, час перебування яких у шарі є меншим за час досягнення критичного вмісту вологи $\omega_{кр}$, у цьому випадку має бути вищою, ніж за умови сушіння всіх частинок лише в першому періоді, що зумовлено підвищенням середнього температурного рівня сушильного агента в псевдозрідженому шарі.

Для визначення швидкості сушіння в періоді падаючої швидкості можна вирішувати завдання тепло- та масообміну для кожної окремої частки. Однак внаслідок великої кількості різних параметрів, що характеризують тепло-і масообмін, що залежать від режиму сушіння та властивостей матеріалу, це завдання дуже складне.

Для визначення середнього вмісту вологи частинок можуть бути використані виведені спрощені рівняння. У роботах [33-36] для періоду падаючої швидкості запропоновано спрощене рівняння кінетичної кривої сушіння, одержане шляхом заміни залежності $d\omega/dt$ від ω прямою, що проходить через точку рівноважної вологості ω_p . У результаті такої заміни отримують таке рівняння:

$$\frac{d\omega}{d\tau} = -N\chi(\omega - \omega_p), \quad (4)$$

де N – є постійною величиною і залежить тільки від режиму сушіння;

$$\chi = \frac{1}{\omega_{кр} - \omega_p}; \quad (5)$$

χ – визначається властивостями матеріалу.

Аналіз значної кількості експериментальних досліджень дав підстави встановити, що коефіцієнт χ у виразі (4) істотно визначається вологістю матеріалу. Виходячи з цього запропоновано такий вираз для наведеної швидкості сушіння:

$$\psi = \frac{(\omega - \omega_p)^m}{A + \beta(\omega - \omega_p)^m}. \quad (6)$$

У виразі (6) параметри m , A , β розглядаються як безрозмірні коефіцієнти, що не залежать від вологості матеріалу. При цьому коефіцієнт m визначається без урахування розмірів і форми матеріалу. Для пористих матеріалів зазвичай приймають $m = 0,5$, для капілярних тіл $m = 1$, а для колоїдно-капілярних тіл $m = 2$. На відміну від коефіцієнта m , коефіцієнти A і β пов'язані з розмірами та властивостями матеріалу. Їх значення можуть змінювати знак, що обумовлено характером зміни температури матеріалу під час сушіння. Для визначення коефіцієнтів A і β використовується методика графічної обробки результатів експериментальних досліджень. Крім того, ці коефіцієнти задаються як функції критичної та рівноважної вологості.

Отже, швидкість сушіння в другому періоді визначається за формулою:

$$\frac{d\omega}{d\tau} = -N\psi. \quad (7)$$

Безпосередній аналіз загального рівняння (1) є складним, тому задачу сушіння зазвичай розглядають через окремі часткові випадки. Після введення відповідних спрощень це дає можливість використати рівняння (1) для розв'язання задачі сушіння, зокрема для визначення розподілу вмісту вологи на виході з апарату. Один із підходів ґрунтується на припущенні про повне перемішування матеріалу в межах усього об'єму апарату. За такої умови функція ρ вважається однорідною в просторі псевдозрідженого шару і не залежить від радіус-вектора r . У межах цього припущення окремо розглядають випадок частинок постійного однакового розміру та випадок полідисперсного матеріалу, для якого властиве стирання. Крім цього, аналізу підлягає одномірне дифузійне перемішування частинок матеріалу в напрямі його масового руху. У роботі

[37] подано розв’язання загального рівняння (1) для окремих випадків, у яких не враховуються стирання, винесення і сепарація частинок, а також не розглядається просторова неоднорідність в об’ємі псевдозрідженого шару. За таких умов функція розподілу числа частинок за вмістом вологи і за розміром має вигляд:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial \rho}{\partial \omega} \frac{d\omega}{dt} - \frac{\partial \rho}{\partial R} \frac{dR}{dt} + \Phi_{in}(\omega, R) - K_r \rho, \quad (8)$$

з початковими і крайніми умовами:

$$\rho(\omega, R)_{t=0} = \rho^b; \quad \rho(0, R) = \rho_\omega^0; \quad \rho(\omega, 0) = \rho_R^0;$$

де $\Phi_{in}(\omega, R)$ – вхідний потік частинок з вмістом вологи ω і розміром R , K_r – константа вивантаження.

Для чисельного розв’язання рівняння застосовано метод Рунге-Кутта 4-го порядку. Програмний продукт реалізовано мовою програмування Python із використанням вбудованої бібліотеки Matplotlib, призначеної для побудови графіків. З метою одержання результатів роботи математичної моделі розроблено програму, що виконує обчислення диференціального рівняння методом Рунге-Кутта та відображає графік зміни функції розподілу кількості частинок за вологовмістом і розміром (рис. 3-4).

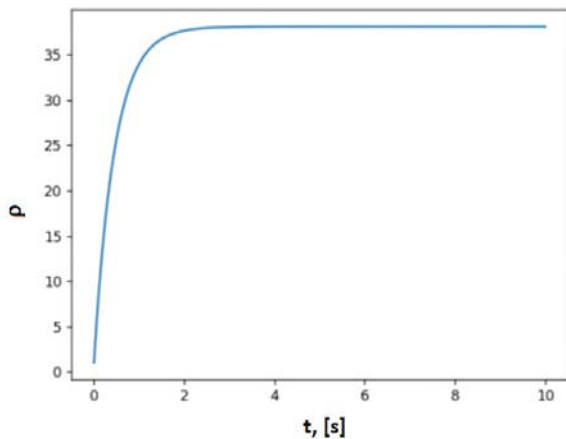


Рис. 3. Перехідна характеристика функції розподілу кількості частинок

Вологість гранул змінюється від 0 до 40 відсотків, а радіус від 0 до 5 мм. На рисунку наведено тривимірну залежність розподілу частинок за вологовмістом та розміром.

Найбільшу кількість гранул одержуємо при значенні вологовмісту близько 30% та радіусу частинок 1,5 мм, що відповідає вимогам якості для гранульованого мінерального добрива.

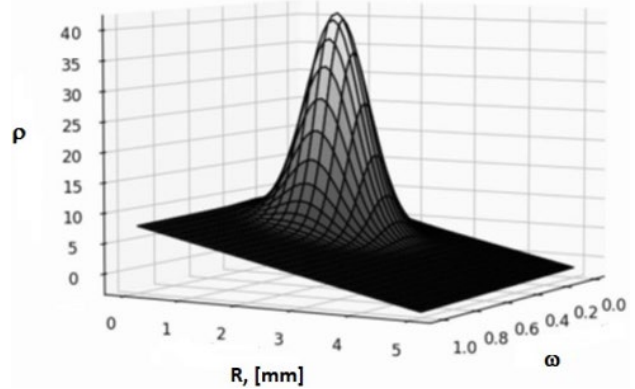


Рис. 4. Розподіл кількості частинок за вологовмістом та розміром

Система управління виробництвом мінеральних добрив з нечітким регулятором

Автоматизація виробництва належить до визначальних складових науково-технічного прогресу, оскільки забезпечує вдосконалення виробничих процесів і сприяє зменшенню витрат енергії та матеріальних ресурсів. Основним інструментом дослідження автоматизованих систем виступає математичне моделювання. При цьому створювана модель має відтворювати характеристики реальної системи з необхідною точністю.

Система управління виробництвом мінеральних добрив з нечітким адаптивним регулятором поєднує можливості нечіткої логіки та адаптивного управління для оптимізації процесів виробництва. Особливістю такої системи є здатність до самонавчання та пристосування до змінних умов і параметрів виробництва. Одним із найважливіших напрямів застосування теорії нечітких множин є використання контролерів нечіткої логіки. На відміну від звичайних контролерів, вони функціонують на основі знань експертів, які використовуються для опису системи, а не на основі диференціальних рівнянь. Такі знання можуть бути виражені за допомогою лінгвістичних змінних, визначених нечіткими множинами. Загальна структура регулятора з використанням нечіткої логіки показана на рис. 5.

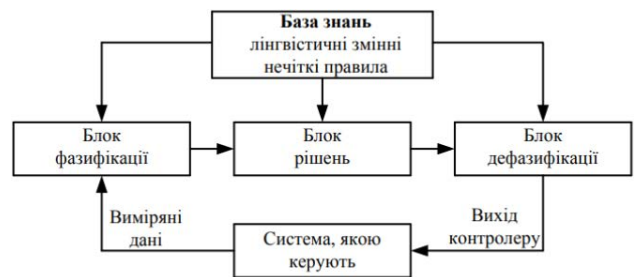


Рис. 5. Загальна структура нечіткого регулятора

Загальна структура включає такі компоненти: блок фазифікації, базу знань, блок прийняття рішень та блок дефазифікації.

Блок фазифікації перетворює різні значення, виміряні на виході об'єкта управління, у нечіткі значення, визначені лінгвістичними змінними у базі знань.

Блок прийняття рішень формує необхідні керуючі впливи на основі нечітких входних даних. Для цього використовуються нечіткі умовні правила, вбудовані у базу знань, а самі керуючі впливи також задаються в нечіткій формі. Після цього блок дефазифікації виконує перетворення вихідних нечітких даних блоку прийняття рішень у чіткі значення, які надалі використовуються для управління об'єктами.

Незалежно від конкретної реалізації, системи, що використовують нечітку логіку, функціонують за спільним принципом. Значення, отримані з вимірювального пристрою, спочатку подаються в нечіткій формі, далі проходять етап обробки, після чого дефазифікуються і у вигляді звичайних сигналів надходять на виконавчі механізми.

Нечітка система може бути використана як схема управління. У розглядуваному випадку входний простір задається часовим рядом відповідних змінних. Основне завдання полягає в тому, щоб за допомогою набору нечітких правил розрізнити різні керуючі дії за їх властивостями.

Нехай існує n керуючих дій CA_1, CA_2, \dots, CA_n . Якщо нечітка кластеризація використовується для знаходження n пар $(X_i, Y_i), i=1, \dots, n$, то кожна з них може бути поставлена у відповідність центру одного з n кластерів. За таких умов набір нечітких правил записується безпосередньо в такому вигляді:

$$\begin{aligned} \text{Якщо } X \in x_1 \text{ і } Y \in y_1, \text{ то } U \in CA_1 \\ \text{Якщо } X \in x_2 \text{ і } Y \in y_2, \text{ то } U \in CA_2 \\ \dots \dots \dots \\ \text{Якщо } X \in x_n \text{ і } Y \in y_n, \text{ то } U \in CA_n \end{aligned} \quad (9)$$

Сформований таким чином набір нечітких правил може бути використаний для виконання контрольного завдання через визначення відповідних значень керуючої змінної U . Для випадків більшої розмірності цей підхід також зберігає придатність і може бути розширений простим способом.

Разом з тим, однією з критичних проблем залишається експоненціальне зростання кількості правил, які потрібно виконувати. Завершення проектування нечіткої системи потребує також задання функцій приналежності для нечітких значень лінгвістичних змінних X і Y та оцінювання відпо-

відних значень їх параметрів. Загальна структура нечіткої схеми управління наведена на рис. 6.

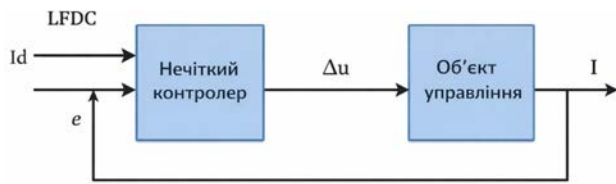


Рис. 6. Структура нечіткої схеми управління

Для побудови системи управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром отримали передавальну функцію об'єкту управління за допомогою пакету Matlab – System Identification toolbox (SIT). System Identification Toolbox надає функції MATLAB, блоки Simulink і додаток для динамічного моделювання системи, аналізу часових рядів і прогнозування. Отримана передавальна функція об'єкту управління зображена на рис. 7. Перехідна характеристика об'єкту управління отримана за допомогою передавальної функції (рис. 8).

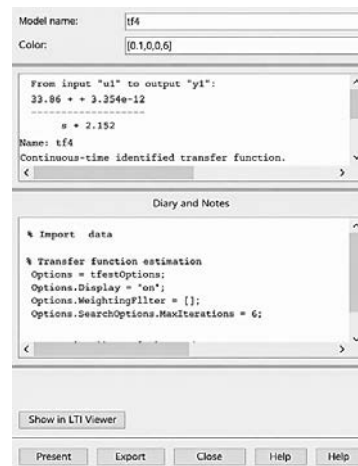


Рис. 7. Передавальна функція об'єкту управління

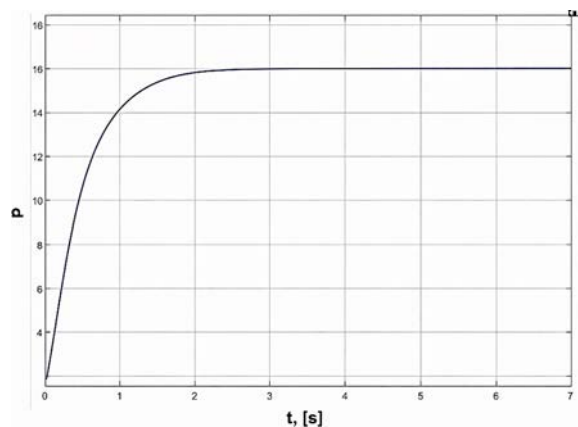


Рис. 8. Перехідна характеристика об'єкту управління отримана за допомогою передавальної функції

За допомогою Fuzzy Logic Toolbox – набору функцій, вбудованих в Matlab реалізована система управління виробництвом мінеральних добрив із нечітким регулятором (рис. 9). Отримано перехідну характеристику системи управління виробництвом мінеральних добрив із нечітким регулятором (рис. 8).

Побудована система управління виробництвом мінеральних добрив із нечітким регулятором забезпечує вихід гранулятора з псевдозрідженим шаром на заданий режим роботи на 1 с швидше, що значно підвищує ефективність управління технологічним процесом. Таким чином запропонована система управління із нечітким регулятором може бути використана для одержання гранул заданої якості (вологівміст, розмір).

Висновки. Розроблено систему управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром із нечітким регулятором. Для створення системи управління використовувалась математична модель розподілу кількості гранул за вологовмістом та розміром. Визначено передавальну функцію та на її базі з використанням нечіткого регулятора проведено оцінку створеної системи. Реалізація системи управління з нечітким регулятором дозволило значно збільшити швидкість виходу гранулятора із псевдозрідженим шаром на заданий рівень гранулометричного складу.

Для створення системи також використовуються пакети Fuzzy Logic Toolbox та System Identification Toolbox програмного забезпечення MatLab.

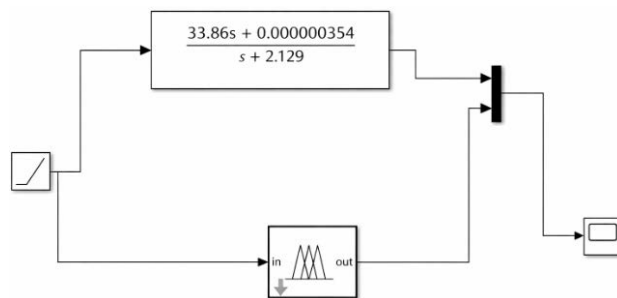


Рис. 9. Схема системи управління виробництвом мінеральних добрив з нечітким регулятором

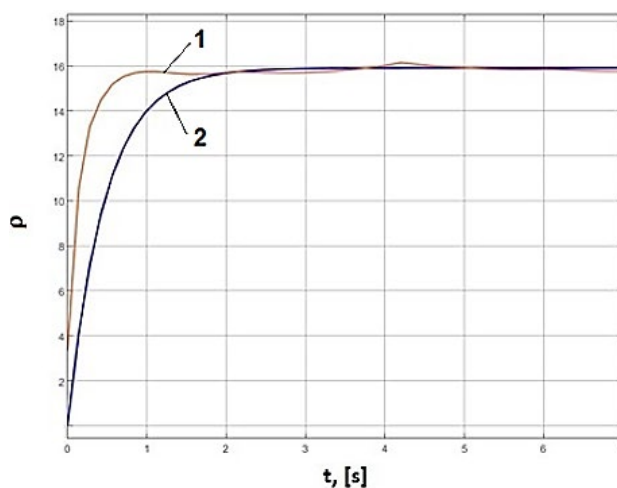


Рис. 10. Перехідна характеристика системи управління виробництвом мінеральних добрив із нечітким регулятором – 1, перехідна характеристика об'єкту управління – 2

Список літератури:

1. Bouffard J., Kaster M., Dumont H. Influence of Process Variable and Physicochemical Properties on the Granulation Mechanism of Mannitol in a Fluid Bed Top Spray Granulator. *Drug Development and Industrial Pharmacy*. 2005. Vol. 31, № 9. Pp. 923–933. DOI: 10.1080/03639040500272124.
2. Biggs C.A. et al. Fluidised bed granulation: modelling the growth and breakage kinetics using population balances. Proceedings of World Congress on Particle Technology. Sydney, Australia, 2002. Vol. 4. Pp. 629–636.
3. Rambali B., Baert L., Massart D.L. Using experimental design to optimize the process parameters in fluidized bed granulation on a semi-full scale. *International Journal of Pharmaceutics*. 2001. Vol. 220, № 1–2. Pp. 149–160. DOI: 10.1016/S0378-5173(01)00658-5.
4. Vreman A.W., van Lare C.E., Hounslow M.J. A basic population balance model for fluid bed spray granulation. *Chemical Engineering Science*. 2009. Vol. 64, № 21. Pp. 4389–4398. DOI: 10.1016/j.ces.2009.07.010.
5. van Peborgh Gooch J.R., Hounslow M.J. Monte Carlo simulation of size-enlargement mechanisms in crystallization. *AIChE Journal*. 1996. Vol. 42, № 7. Pp. 1864–1874. DOI: 10.1002/aic.690420708.
6. Gidaspow D. Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions. San Diego: Academic Press, 1994. 467 p.
7. 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. Vol. 9, № 4. Pp. 1070–1077. DOI: 10.1208/s12249-008-9147-4.
8. Johnsson F., Zijerveld R.C., Schouten J.C., van den Bleek C.M., Leckner B. Characterization of fluidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuations. *International Journal of Multiphase Flow*. 2000. Vol. 26, № 4. Pp. 663–715. DOI: 10.1016/S0301-9322(99)00028-2.
9. Halstensen M., de Bakker P., Esbensen K.H. Acoustic chemometric monitoring an industrial granulation production process – a PAT feasibility study. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2006. Vol. 84, № 1–2. Pp. 88–97. DOI: 10.1016/j.chemolab.2006.05.012.

10. Schouten J.C., van den Bleek C.M. Monitoring the quality of fluidization using the short-term predictability of pressure fluctuations. *AIChE Journal*. 1998. Vol. 44, № 1. Pp. 48–60. DOI: 10.1002/aic.690440107.
11. Moris V.A.S., Visnadi C.B., Cunha R.L.G., Rocha S.C.S., Taranto O.P. Monitoring of fluidized bed coating process of microcrystalline cellulose. XXXII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. Maringá, Paraná, Brazil, 2006.
12. Parise M.R., Silva C.A.M., Ramazini M.J., Taranto O.P. Identification of defluidization in fluidized bed coating using the Gaussian spectral pressure distribution. *Powder Technology*. 2011. Vol. 206. Pp. 149–153. DOI: 10.1016/j.powtec.2010.07.008.
13. Nieuwmeyer F.J.S., Damen M., Gerich A., Rusmini F., van der Voort Maarschalk K., 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. Vol. 24, № 10. Pp. 1854–1861. DOI: 10.1007/s11095-007-9305-5.
14. Hu X., Cunningham J.C., Winstead D. Study growth kinetics in fluidized bed granulation with at-line FBRM. *International Journal of Pharmaceutics*. 2008. Vol. 347, № 1–2. Pp. 54–61. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2007.06.043.
15. Tok A., Goh X.P., Ng W., Tan R. Monitoring granulation rate processes using three PAT tools in a pilot-scale fluidized bed. *AAPS PharmSciTech*. 2008. Vol. 9, № 4. Pp. 1083–1091. DOI: 10.1208/s12249-008-9145-6.
16. 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 of Pharmaceutical Innovation*. 2010. Vol. 5, № 1. Pp. 58–68. DOI: 10.1007/s12247-010-9079-x.
17. Book G., Albion K., Briens L., Briens C., Berruti F. On-line detection of bed fluidity in gas-solid fluidized beds with liquid injection by passive acoustic and vibrometric methods. *Powder Technology*. 2011. Vol. 205, № 1–3. Pp. 126–136. DOI: 10.1016/j.powtec.2010.09.002.
18. Buschmüller C., Wiedey W., Döscher C., Dressler J., Breikreutz J. In-line monitoring of granule moisture in fluidized-bed dryers using microwave resonance technology. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. 2008. Vol. 69, № 1. Pp. 380–387. DOI: 10.1016/j.ejpb.2007.09.014.
19. Wang H.G., Senior P.R., Mann R., Yang W.Q. Online measurement and control of solids moisture in fluidized bed dryers. *Chemical Engineering Science*. 2009. Vol. 64, № 12. Pp. 2893–2902. DOI: 10.1016/j.ces.2009.03.014.
20. 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. Vol. 14, № 12. Pp. 2203–2210.
21. 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. Vol. 15, № 7. Pp. 890–900.
22. Korniyenko B., Galata L., Ladieva L. Mathematical model of threats resistance in the critical information resources protection system. *CEUR Workshop Proceedings*. 2019. Vol. 2577. Pp. 281–291.
23. Korniyenko B., Korniyenko Y., Haidai S., Liubeka A., Hulienko S. Conditions of nonuniform fluidization in an auto-oscillating mode. In: Hu Z., Petoukhov S., Yanovsky F., He M. (eds.) ISEM 2021. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 463. Pp. 14–27. DOI: 10.1007/978-3-031-03877-8_2.
24. Korniyenko B., Korniyenko Y., Haidai S., Liubeka A. The heat exchange in the process of granulation with non-uniform fluidization. In: Hu Z., Petoukhov S., Yanovsky F., He M. (eds.) ISEM 2021. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 463. Pp. 28–37. DOI: 10.1007/978-3-031-03877-8_3.
25. Korniyenko B., Ladieva L. Mathematical modeling dynamics of the process dehydration and granulation in the fluidized bed. In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds.) ICCSEE 2020. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021. Vol. 1247. Pp. 18–30. DOI: 10.1007/978-3-030-55506-1_2.
26. Korniyenko B., Ladieva L., Galata L. Control system for the production of mineral fertilizers in a granulator with a fluidized bed. In: 2020 2nd IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT). 2020. Pp. 307–310. DOI: 10.1109/ATIT50783.2020.9349344.
27. Korniyenko B., Galata L., Ladieva L. Research of information protection system of corporate network based on GNS3. In: 2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT). 2019. Pp. 244–248. DOI: 10.1109/ATIT49449.2019.9030472.
28. Korniyenko B.Y., Ladieva L.R., Galata L.P. Mathematical model of heat transfer process of production of granulated fertilizers in fluidized bed. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2021. Vol. 16, № 20. Pp. 2126–2131.
29. Korniyenko B., Zabolotnyi V., Galata L. The optimization of the critical resource protection system of a mineral fertilizers manufacturing facility. In: Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS 2021). 2021. Vol. 1. Pp. 172–178. DOI: 10.1109/IDAACS53288.2021.9661019.

30. Galata L., Korniyenko B. Research of the Training Ground for the Protection of Critical Information Resources by iRisk Method. *Mechanisms and Machine Science*. 2020. Vol. 70. Pp. 227–237. DOI: 10.1007/978-3-030-13321-4_21.
31. Галата Л.П., Корнієнко Б.Я., Заболотний В.В. Математична модель протидії загрозам у системі захисту критичних інформаційних ресурсів. *Наукоємні технології*. 2019. Том 43. № 3. С. 300 – 306.
32. Корнієнко Б.Я., Галата Л.П. Оптимізація системи захисту інформації корпоративної мережі. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*. 2019. Випуск 19. С. 56-62.
33. 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.
34. Корнієнко Б.Я., Юдін О.К., Снігур О.С. Безпека аутентифікації у web-ресурсах. *Захист інформації*. 2012. № 1 (54). С. 20-25. DOI: 10.18372/2410-7840.14.2056 (ukr).
35. Корнієнко Б. Я. Дослідження моделі взаємодії відкритих систем з погляду інформаційної безпеки. *Наукоємні технології*. 2012. № 3 (15). С. 83–89, doi.org/10.18372/2310-5461.15.5120 (ukr).
36. Корнієнко Б.Я. Побудова та тестування імітаційного полігону захисту критичних інформаційних ресурсів. *Наукоємні технології*. 2017. № 4 (36). С. 316 - 322.
37. Korniyenko B.Y. The two phase model of formation of mineral fertilizers in the fluidized-bed granulator. *The Advanced Science Journal*. 2013. №4. P. 41-44.
38. Korniyenko B., Kornienko 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. No 463. P. 14-27.

Korniyenko B.Ya., Ladieva L.R., Kornienko Ya.M., Nesteruk A.O., Savina O.O. CONTROL SYSTEM FOR THE PRODUCTION OF MINERAL FERTILIZERS IN A FLUIDIZED BED GRANULATOR WITH A FUZZY CONTROLLER

The article develops a control system for the production of mineral fertilizers in a fluidized bed granulator with a fuzzy controller. The main advantages of the production of mineral fertilizers in a fluidized bed granulator are presented. The main characteristics of the finished product are determined - the granulometric composition and moisture content of the granules. A mathematical model of the distribution of the number of granules by moisture content and size was used to create the control system. The transient characteristic of the particle number distribution function and the distribution of the number of particles by moisture content and size were obtained. The theoretical principles of building a control system for the production of mineral fertilizers in a fluidized bed granulator with a fuzzy controller are presented. The general structure of the fuzzy controller is presented. The general structure includes the following components: a fuzzification block, a knowledge base, a decision-making block, and a defuzzification block. The general structure of a fuzzy controller is considered, which includes a fuzzification block, a knowledge base, a decision-making block, and a defuzzification block. The function of the fuzzification block is to transform the values obtained at the output of the control object into fuzzy values, which are described by linguistic variables specified in the knowledge base. Based on the fuzzy conditional rules embedded in the knowledge base, the decision-making block forms control influences from fuzzy input data, and these influences are also presented in a fuzzy form. The defuzzification block further transforms the results of this block into clear values, after which they can be used to control objects. Thus, it is advisable to use a fuzzy system as a control scheme. A transfer function is determined for the created system, and its performance is evaluated on its basis using a fuzzy controller. The implementation of the control system with a fuzzy controller made it possible to significantly increase the output speed of the fluidized bed granulator to a given level of granulometric composition. The Fuzzy Logic Toolbox and System Identification Toolbox packages of the MatLab software are also used to create the system.

Keywords: control system, mineral fertilizers, fluidized bed granulator, fuzzy controller, mathematical model.

Дата першого надходження статті до видання: 17.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026