

УДК 517.977.5

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.6>

Андрій НЕСТЕРУК

аспірант кафедри інформаційних систем та технологій, асистент кафедри інформаційних систем та технологій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Перемоги, 37, Київ, Україна, індекс 03056 (aonesteruk@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-1563-7245

Богдан КОРНІЄНКО

доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних систем та технологій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Перемоги, 37, Київ, Україна, індекс 03056 (bogdanko@gmx.net)

ORCID: 0000-0002-2521-0878

Andrii NESTERUK

graduate student of the Department of Information Systems and Technologies, assistant of the Department of Information Systems and Technologies, National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute", 37 Peremogy Avenue, Kyiv, Ukraine, postal code 03056 (aonesteruk@gmail.com)

Bogdan KORNIYENKO

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Systems and Technologies, National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Peremogy Avenue, Kyiv, Ukraine, postal code 03056 (bogdanko@gmx.net)

Бібліографічний опис статті: Нестерук, А., Корнієнко, Б. Математична модель процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром. *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. Вип. 2(8). 51–61. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.6>

Bibliographic description of the article: Nesteruk, A., Kornienko, B. (2023). Matematychna model protsesu vyrobnytstva mineralnykh dobriv u hranulatori z psevozridzhenym sharom [Mathematical model of the process of production of mineral fertilizers in a fluidized bed granulator]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo – Information technology and society*, 2(8), 51–61. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.6>

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ
У ГРАНУЛЯТОРІ З ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ**

Проведено аналіз підходів до математичного моделювання процесу виготовлення мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром. Розроблено математичну модель процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі, що розглядає процес як гетерогенний та трифазний, під час якого між собою взаємодіють три окремі фази: частинки – центри гранулювання, вихідна речовина – сульфат амонію у вигляді крапель та теплоносій – повітря. Математична модель враховує гідродинаміку псевдозрідженого шару, передачу кінетичної енергії, розсіювання енергії, стиснення крапель з частинками, їх адгезію до поверхні, кінетику сушіння розчину на поверхні частинок. Запропонована математична модель може використовуватись для побудови інформаційної технології управління процесом гранулювання у псевдозрідженому шарі.

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

**MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF PRODUCTION
OF MINERAL FERTILIZERS IN A FLUIDIZED BED GRANULATOR**

An analysis of approaches to mathematical modeling of the process of the process of manufacturing mineral fertilizers in a fluidized bed granulator was carried out. A mathematical model of the granulation process in a fluidized bed has been developed, which considers the process as heterogeneous and three-phase, during which three separate phases interact with each other: particles – granulation centers, starting material – ammonium sulfate in the form of drops, and coolant – air. The mathematical model takes into account the hydrodynamics of the fluidized bed, the transfer of kinetic energy, the dissipation of energy, the compression of droplets with particles, their adhesion to the surface, the kinetics of drying the solution on the surface of the particles. The proposed mathematical model can be used to build information technology for managing the granulation process in a fluidized bed.

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

Постановка проблеми. Промислове застосування методу псевдозрідження викликано суттєвим переліком його переваг. У псевдозрідженому шарі відбувається активне перемішування твердої фази, якість обробки якої безпосередньо впливає на якість готового продукту. Також гранулятори псевдозрідженого шару мають відносно просту конструкцію, непогано піддаються механізації та автоматизації.

При сучасних світових тенденціях до зростання споживання продукції різних галузей промисловості та екологічній ситуації гостро постає проблема раціонального використання в промисловому виробництві енергетичних та сировинних ресурсів з метою одержання максимальної кількості готового продукту заданої якості. Важливим етапом вирішення цієї задачі є створення адекватної математичної моделі процесу.

Математична модель має правильно відображати технологічний процес, його характерні риси, але також не має бути переускладнена деталями, що несуттєво впливають на вирішення поставленої задачі. Отримання адекватної моделі апарату дозволяє коректно розробити реальну для втілення стратегію керування технологічним процесом.

Аналіз попередніх досліджень. Апарати із псевдозрідженим шаром відіграють важливу роль у широкому міжгалузевому спектрі технологічних процесів, тому вдосконалення та модернізація існуючих, а також розробка нових високоефективних конструкцій апаратів із псевдозрідженим шаром безпосередньо відповідає пріоритетному напрямку технологічного розвитку не лише хімічної технології, а й суміжних галузей.

Широке застосування апаратів із псевдозрідженим шаром призвело до розробки значної кількості моделей, що описують гідромеханіку процесу псевдозрідження. Облік у таких моделях різних факторів, що визначають кінетику сумарного процесу або його окремих стадій, призвів до формування ще ширшого діапазону моделей для розрахунку хіміко-технологічних процесів у шарі. Однак існуюче розмаїття підходів мало просунуло інженерні методи розрахунку, які значною мірою продовжують спиратися на балансові співвідношення та уявлення шару як системи із зосередженими параметрами, де реальний розподіл параметрів компенсується введенням численних емпіричних коефіцієнтів, що визначаються експериментально на вже існуючих апаратах з псевдозрідженим шаром. Такий підхід не завжди здатний забезпечити необхідну точність прогнозу, особливо при зміні конструктивних елементів апарату або виході режимних параметрів за кордон дослідженого діапазону. Крім того, виключається постановка та вирішення завдань оптимального управління процесами, що може становити значний резерв підвищення ефективності їх проведення. Різноманітні моделі, що пропонують глибший математичний аналіз процесів у псевдозрідженому шарі, що розглядають умовно нескінченно малий обсяг шару могли б дати відповіді на багато питань, що виникають під час експлуатації та проектування. Однак подібні моделі практично недоступні для інженерної практики через їх складність та обчислювальну громіздкість, а головне, перевантаженість численними параметрами, ідентифікація яких скрутна або неможлива. Таким чином, розробка ефективних математичних інструментів для опису протікання процесів в апаратах з псевдозрідженим шаром залишається актуальною.

Метою статті є розробка нової математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі для подальшої розробки системи керування на її основі.

Виклад основного матеріалу.

Переваги апаратів псевдозрідженого шару

В апаратах псевдозрідженого шару здійснюється контакт між розвиненою поверхнею дисперсної твердої фази, власне тої, що складає шар, і вертикальним потоком зважуючого потоку газу (рідше крапельної рідини). Розвинена поверхня контакту твердої та газової фаз необхідна для проведення процесів теплообміну, випалювання, горіння, сушки, каталітичних процесів за участю дисперсних каталізаторів, адсорбції та ін.

У порівнянні з іншими апаратами, в яких також відбувається контакт дисперсної твердої і газової (рідкої) фаз (частіше це апарати з нерухомим шаром, що фільтрується) апарати з псевдозрідженим шаром володіють наступними перевагами:

- відносна простота конструкції – найчастіше це вертикальний апарат з прямокутним або круглим перетином, зазвичай не має рухомих частин;
- практична ізотермічність всього обсягу, забезпечується інтенсивним перемішуванням дисперсної фази, має велике значення для більшості процесів з виділенням або поглинанням теплоти;
- можливість підвищення витрат зважувального газу без збільшення перепаду тиску на шарі матеріалу, що є суттєвим зважаючи на обмеженість напорів, що розвиваються вентиляторами великої продуктивності;
- текучість шару, яка дозволяє безперервно вивантажувати дисперсний матеріал через простий патрубок.

Недоліки апаратів з псевдозрідженим шаром дисперсного матеріалу пов'язані з інтенсивним перемішуванням в обсязі шару, наприклад:

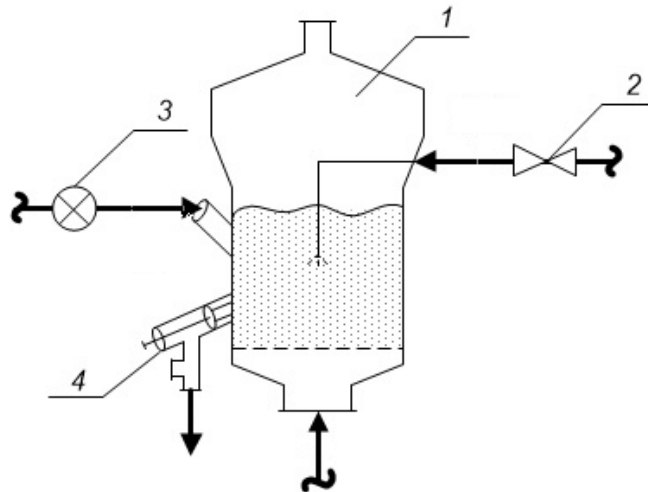
- знос конструкційних матеріалів, а також ерозія внутрішніх поверхонь апарату гранулювання;
- виникнення електростатичного заряду на поверхні псевдозріджуваних діелектричних матеріалів;
- різні часи перебування окремих порцій дисперсного матеріалу (його окремих частинок) в обсязі шару, що призводить до різного ступеня обробки (нагрівання, випалювання, вигоряння, висушування, адсорбції, розмірів гранул або кристалів і ін.) різних частин загального потоку, що вивантажується з апарату дисперсного матеріалу.

Процес псевдозрідження забезпечує рівномірну структуру псевдозрідженого шару тільки при використанні в якості псевдозріджувача крапельних рідин. При псевдозрідженні відносно легкими і малов'язкими газами в шарі утворюються газові бульбашки, всередині яких контакт дисперсного матеріалу з суцільним середовищем практично відсутній, що особливо суттєво, наприклад, для каталітичних процесів. При псевдозрідженні дуже дрібних частинок (менше 1 мм в діаметрі) майже неможливо запобігти утворенню каналів, що в більшому ступені погіршує якість міжфазного контакту в шарі. Кращими для забезпечення рівномірності псевдозрідження є монодисперні, округлі частинки з мінімальною поверхневою адгезією (хорошою сипучістю).

На внутрішню структуру псевдозрідженого шару в значній мірі впливає пристрій (конструкція) газорозподільної решітки в нижній частині апарату, через яку в шар подається псевдозріджувач.

При гранулюванні розчинів зневодненням на перший план висувається вимога отримання продукту, що має певний гранулометричний склад. В загальному випадку механізм росту гранул залежить від властивостей використаних речовин, режиму процесу та інших факторів, що визначають характер взаємодії диспергованих рідкої та твердої фаз.

В нашому випадку численні дослідження підтвердили, що найбільше на стан готового продукту, основним показником якості якого є еквівалентний діаметр часток, впливає температура псевдозрідженого шару, в якому вони формуються. Саме тому її обрано головною керованою величиною в апараті, що розглядається. Розглянемо побудову апарату для гранулювання речовин у псевдозрідженому шарі. У гранулятор 1 із псевдозрідженим шаром за допомогою виконавчого пристрою 2 подають розчин, а виконавчим пристроєм 3 подають центри грануляції. Знизу до верху подається нагрітий теплоносій – повітря. Готовий продукт – гранули вивантажують за допомогою виконавчого пристрою 4.



**Рис. 1. 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**

В апаратах із псевдозрідженим шаром гранулювання здійснюється розпилюванням пульп, розчинів або плавів на поверхню зріджених частинок. При цьому на частинках відкладаються тонкі плівки гранульованої речовини, де вони висушуються, кристалізуються, збільшуючи тим самим розмір гранул до необхідної величини. Інша (незначна) частина, яка вводиться всередину шару розчину, висихає в зоні

розпили, утворюючи дрібні сухі частинки, з яких одні несуться газовим потоком з апарату (винесення), інші залишаються в апараті в якості внутрішнього ретурна (нових центрів гранулоутворення).

До основних переваг даного способу відносяться: невеликі габарити і висока продуктивність установок; сферична форма гранул готового продукту; отримання продукту необхідного хімічного та гранулометричного складу; інтенсифікація тепло-і масообмінних процесів за рахунок максимального ступеня контакту між твердими частками зваженого шару і газовим теплоносієм; автоматизоване управління роботою установки. До недоліків способу відносяться: пилевинос і ретельне очищення газу, що відходить з апарату; різний час перебування частинок в апараті.

В зв'язку із постійним зростанням масштабів виробництва та відповідно апаратів із псевдозрідженим шаром значні труднощі виникають із урахуванням явищ взаємодії газу та частинки (сили опору) та взаємодії частинка-частинка (сили зіткнення). Вирішення цих проблем шляхом тривалих досліджень на пілотних установках є досить дорогим.

Для полегшення процесу проектування апаратів із псевдозрідженим шаром корисним інструментом може бути комп'ютерне моделювання. Основні ж труднощі при моделюванні апаратів із псевдозрідженим шаром у натуральну величину пов'язані із великою різницею масштабів: найбільші структури потоку можуть бути порядку декількох метрів, деякі структури можуть напряму залежати від зіткнень частинка-частинка та взаємодії частинка-газ, що відбуваються на міліметровому рівні.

Огляд методів математичного моделювання процесів дегідратації та грануляції в киплячому шарі

Модель балансу використовується для опису зміни гранулометричного складу процесу гранулювання в киплячому шарі [1-2]. Загальне рівняння балансу на основі довжини пакетного режиму, яке описує швидкість зміни функції густини числа частинок $n(t,L)$, задається таким чином [3]:

$$\frac{\partial n(t,L)}{\partial t} = B(t,L) \quad (1)$$

$$- \frac{\partial}{\partial L}(G(t,L)n(t,L)) \quad (2)$$

$$+ \frac{L^2}{2} \int_0^L \frac{\beta(t, (L^3 - \lambda^3)^{\frac{1}{3}})}{(L^3 - \lambda^3)^{\frac{2}{3}}} n(t, (L^3 - \lambda^3)^{\frac{1}{3}}) n(t, \lambda) d\lambda - n(t,L) \int_0^\infty \beta(t, L, \lambda) n(t, \lambda) d\lambda \quad (3)$$

$$+ \int_L^\infty S(t, \lambda) b(t, L | \lambda) n(t, \lambda) d\lambda - S(t,L) n(t,L) \quad (4)$$

Зростання гранул в апараті з киплячим шаром відбувається в основному за рахунок нашарування. При цьому необхідно враховувати агрегацію частинок. Для моделювання балансу використовується лише одне ядро грануляційного росту в киплячому шарі [2]:

$$G = \frac{2(1-b)\Phi}{\pi \int_0^\infty nL^2 dL} \quad (5)$$

У дискретному методі рівняння моделі балансу розв'язується для кожного розмірного інтервалу. Тому перевага цього методу в тому, що в результаті ми отримуємо розподіл частинок за розміром.

Моментний метод – це варіант розв'язання балансової моделі за моментних умов, який визначається як:

$$m_k(t) = \int_0^{+\infty} n(L;t) L^k dL \quad (6)$$

Моменти тісно пов'язані з важливими інтегральними величинами сукупності частинок, такими як середня або загальна площа поверхні та об'єм частинок. Порівняно з балансовою моделлю, чисельне рішення потребує меншої обчислювальної потужності.

Розвиток комп'ютерних технологій дозволив використовувати гідродинамічну модель, яка описує динаміку взаємодії газу і твердих частинок. Для моделювання в грануляторі з киплячим шаром існує дві різні категорії гідродинамічних моделей: модель Ейлера та модель Лагранжа [4].

Модель Ейлера дозволяє включати декілька твердих речовин вторинної фази. Збереження маси та імпульсу виконується відповідно для кожної фази. Таким чином, модель Ейлера розв'язує набір із n рівнянь неперервності та імпульсу, що робить цей підхід однією з найскладніших багатофазних моделей.

Модель Ейлера-Ейлера, відома як модель континууму або модель двох рідин, описує еволюцію взаємодії між твердою та газовою фазами. Взаємодія між двома фазами залежить від гідравлічного опору між фазами, тобто локальних відносних швидкостей фаз і локальних об'ємних часток фаз. У результаті моделювання методу обчислювальної гідродинаміки на основі схеми Ейлера-Ейлера прийнято для дослідження багатофазного потоку газ-тверді тіла в грануляторі з киплячим шаром [5-7].

Модель Лагранжа вирішує рівняння руху для кожної гранули, враховуючи зіткнення частинок і сили, що діють на частинку з боку газу. Тому, коли кількість частинок велика, краще використовувати моделі Ейлера-Ейлера [8-10].

Модель Лагранжа-Ейлера описує газові бульбашки як дискретні частинки, які можуть стикатися, об'єднуватися, зупинятися, стискатися та рости. Модель Ейлера не підходить для твердої фази, але вона підходить для опису емульсії газової фази і частинок [11-19].

Математична модель процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шару

Розроблена математична модель враховує гідродинаміку псевдозрідженого шару, передачу кінетичної енергії, розсіювання енергії, стиснення крапель з частинками, їх адгезію до поверхні, кінетику висихання розчину на поверхні частинок [20-28]. Систему рівнянь розроблено з урахуванням емпіричних співвідношень для розрахунку питомої швидкості зневоднення, питомої швидкості осадження крапель на частинках в результаті адгезії, коефіцієнта осьового розсіювання частинок, коефіцієнтів тепловіддачі, коефіцієнта для розрахунку втрата матеріалу і товщина шару покриття, а також початкових умов [29-32].

Зростання гранул тим імовірніше, чим більше сила зчеплення крапель рідини з твердими частинками і її швидкість. Адгезивні властивості краплі, в свою чергу, залежать від твердості поверхні гранул і властивостей розпиленої речовини.

При створенні моделі, процес грануляції в киплячому шарі розглядався як трифазний гетерогенний процес, у якому взаємодіють три компоненти: частинки, вихідний розчин і теплоносія [33-37]. Під час моделювання було прийнято, що параметри псевдозрідженого шару змінюються з часом без урахування зміни висоти та радіальної складової, теплообмін між усіма компонентами процесу конвективний, частинки монодисперсні, немає пористості та агломерації, краплі мають вузький розподіл за розмірами, між краплями не стикаються, злипаються і прилипають до стінок корпусу [38-42].

Для опису процесу теплообміну в грануляторі використовувалася система рівнянь:

– Зміна температури частинок:

$$M_p C_p \frac{d\Theta_p}{dt} = a_p S_p (\Theta_a - \Theta_p) - M_p v_{dry} Q_{dry} + G_d x_d Q_{cryst} + M_p C_p r_p \Theta_{p0} + R_{ad} M_p C_d (\Theta_d - \Theta_p) - \gamma_\Theta - \phi_{ps} \quad (7)$$

де a_p – коефіцієнт теплопередачі частинок, $Bm/(M^2 \cdot K)$; S_p – площа поверхні частинок, m^2 ; Θ_a – температура теплоносія, K ; Θ_p – температура частинок, K ; M_p – маса частинок, kg ; v_{dry} – питома швидкість висихання вологи на частинках або в краплях, $kg/(kg \cdot c)$; Q_{dry} – питома теплота висихання крапель, $Dж/kg$; G_d – масова витрата крапель, kg/c ; x_d – концентрація крапель розчину; Q_{cryst} – питома теплота кристалізації крапель, $Dж/kg$; M_p – маса частинок, kg ; C_p – питома теплоємність частинок, $Dж/(kg \cdot K)$; r_p – коефіцієнт осьового розсіювання частинок, $1/c$; Θ_{p0} – початкова температура частинок, K ; R_{ad} – питома швидкість стікання крапель з частинками, $kg/(kg \cdot c)$; C_d – питома теплоємність краплі, $Dж/(kg \cdot K)$; Θ_d – температура перепадів, K ; γ_Θ – розсіювання енергії при зіткненні, $Dж/c$; ϕ_{ps} – передача кінетичної енергії, $Dж/c$.

– Зміна температури крапель:

$$M_d C_d \frac{d\Theta_d}{dt} = M_d C_d \Theta_{d0} - R_{ad} M_p C_d (\Theta_d - \Theta_p) + M_p v_{dry} Q_{dry} + a_d S_d (\Theta_a - \Theta_d) \quad (8)$$

де M_d – маса крапель, kg ; C_d – питома теплоємність краплі, $Dж/(kg \cdot K)$; Θ_{d0} – початкова температура крапель, K ; R_{ad} – питома швидкість стікання крапель з частинками, $kg/(kg \cdot c)$; M_p – маса частинок, kg ; Θ_d – температура перепадів, K ; Θ_p – температура частинок, K ; v_{dry} – питома швидкість висихання

вологи на частинках або в краплях, $kg/(kg^*c)$; Q_{dry} – питома теплота висихання крапель, $Дж/кг$; ad – коефіцієнт теплопередачі крапель, $Вм/(м^2*К)$; S_d – площа поверхні крапель, $м^2$; θ_a – температура теплоносія, $К$.

– Зміна температури теплоносія:

$$M C_a \frac{d\theta_a}{dt} = G_a (C_a \theta_{a0} - C_a \theta_a) - a_p S_p (\theta_a - \theta_p) - a_d S_d (\theta_a - \theta_d) \quad (9)$$

де G_a – масова витрата теплоносія, $кг/с$; C_a – питома теплоємність теплоносія, $Дж/(кг*К)$; θ_{a0} – початкова температура теплоносія, $К$; θ_a – температура теплоносія, $К$; a_p – коефіцієнт теплопередачі частинок, $Вм/(м^2*К)$; S_p – площа поверхні частинок, $м^2$; θ_p – температура частинок, $К$; a_d – коефіцієнт теплопередачі крапель, $Вм/(м^2*К)$; S_d – площа поверхні крапель, $м^2$; θ_d – температура перепадів, $К$; M_a – маса теплоносія, $кг$.

Питома швидкість течії крапель з частинками може бути розрахована за такою формулою:

$$R_{ad} = \frac{G_d}{M_{p0}} x_d = \frac{G_d}{M_{p0}} \left(\frac{St_d}{St_d + 0.35} \right) \quad (10)$$

де M_{p0} – початкова маса частинок, $кг$; G_d – масова витрата крапель, $кг/с$; St_d – число Стокса для крапель, яке можна розрахувати за такою формулою:

$$St_d = \frac{\rho_d v_a d_d^2}{\mu_a d_p} \quad (11)$$

де ρ_d – густина крапель, $кг/м^3$; v_a – швидкість руху теплоносія, $м/с$; d_d – діаметр крапель, $м$; μ_a – динамічна в'язкість теплоносія, $Па*с$; d_p – діаметр частинок, $м$.

Розсіювання енергії зіткнення – це швидкість розсіювання енергії всередині твердої фази внаслідок зіткнень між частинками. Це явище моделюється за допомогою кореляції Луна:

$$\gamma_\Theta = \frac{12(1 - e_p^2)g_0}{d_p \sqrt{\pi S_p}} \rho_p a_p^2 \Theta_p^{1.5} \quad (12)$$

де e_p – коефіцієнт відновлення зіткнення частинок з іншими частинками, g_0 – функція радіального розподілу, d_p – діаметр частинок, $м$; S_p – площа поверхні частинок, $м^2$; ρ_p – густина частинок, $кг/м^3$; a_p – коефіцієнт теплопередачі частинок, $Вм/(м^2*К)$; Θ_p – температура частинок, $К$.

Передачу кінетичної енергії випадкових частинок із твердої фази в рідку можна розрахувати за формулою:

$$\phi_{ps} = \frac{-3K_{ps} \Theta_p}{S_p} \quad (13)$$

де K_{ps} – коефіцієнт сили взаємодії рідини з твердим тілом, S_p – площа поверхні частинки, $м^2$; Θ_p – температура частинок, $К$.

Кількість тепла, що виділяється при видаленні вологи з поверхні крапель, можна переписати так:

$$M_a v_{dry} Q_{dry} = \beta \frac{M_{h2o} S_p}{R \Theta_p} \Delta P Q_{dry} \quad (14)$$

де β – коефіцієнт масопередачі, $м/с$; M_{h2o} – молекулярна маса води, $г/моль$; R – універсальна газова стала, $(м^2*кг)/(с^2*К*моль)$; ΔP – різниця парціального тиску, $Па$.

Аналіз числових результатів математичної моделі

Для отримання динамічних результатів розробленої математичної моделі створено програму розрахунку даної математичної моделі методом Рунге-Кутта 4-го порядку на мові програмування Python. За допомогою вбудованих математичних бібліотек були проведені розрахунки та візуалізована температурна поведінка частинок і крапель з моменту включення установки до завершення процесу.

Для моделювання були використані наступні значення, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Назва	Позначення	Значення
Маса частинок	M_p	1.5
Маса крапель	M_d	2
Маса теплового носія	M_a	3.5
Початкова маса частинок	M_{p0}	1.53
Питома теплоємність крапель	C_d	1590
Питома теплоємність частинок	C_p	1420
Питома теплоємність теплоносія	C_a	1011
Початкова питома теплоємність теплоносія	C_{a0}	1015
Початкова температура частинок	θ_{p0}	300
Початкова температура крапель	θ_{d0}	293
Початкова температура теплоносія	θ_{a0}	393
Коефіцієнт осьового розсіювання частинок	r_p	$1 \cdot 10^{-5}$
Питома швидкість висихання вологи по частинках або по краплях	v_{dry}	0.47
Питома теплота кристалізації крапель	Q_{cryst}	82300
Питома теплота сушіння крапель	Q_{dry}	5000
Коефіцієнт теплопередачі частинок	a_p	5.57
Коефіцієнт теплопередачі крапель	a_d	5.535
Площа поверхні частинок	S_p	$7.07 \cdot 10^{-7}$
Площа поверхні крапель	S_d	$6.07 \cdot 10^{-6}$
Масовий потік крапель	G_d	0.7
Масова витрата теплоносія	G_a	1
Концентрація розчину падає	x_d	0.37

Після розрахунків отримуємо графік залежності температур крапель, крапель і часу від часу, що показано на рисунку 2:

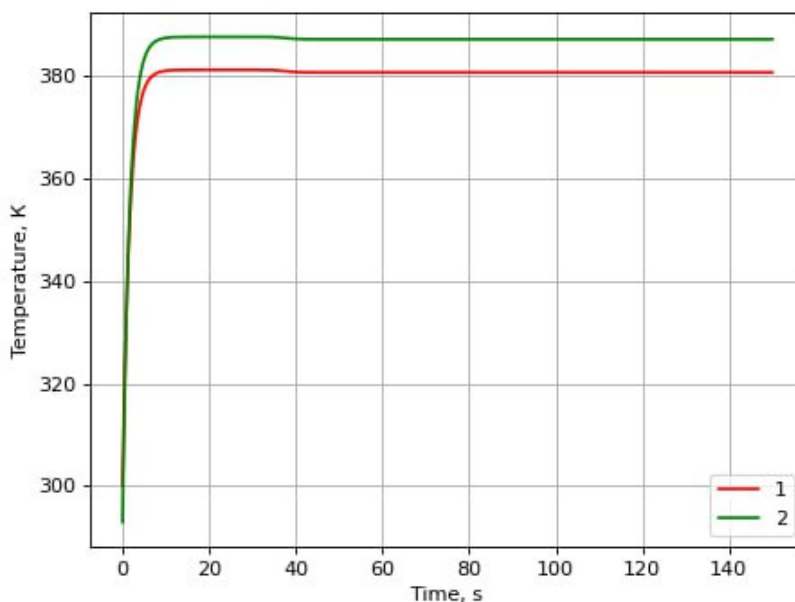


Рис. 2. Графік залежності температур частинок, крапель і повітря від часу (1 – температура частинок, 2 – температура крапель)

Для підтримки стабільної роботи апаратів з псевдозрідженим шаром у необхідному гідродинамічному режимі всередині них необхідно розробити ефективну систему керування процесом зневоднення та гранулювання. Якість цієї системи управління тісно пов'язана з точністю математичної моделі об'єкта, для якого ця система управління розробляється. Отримані результати розрахунку математичної моделі доводять, що вона може слугувати основою для розробки ефективної системи управління. Запропонована математична модель може бути використана для побудови інформаційної технології управління процесом гранулювання в псевдозрідженому шарі.

Висновки. Запропоновано математичну модель процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром, яка може слугувати основою для створення системи керування процесом гранулювання та зневоднення в псевдозрідженому шарі. Представлена математична модель виражає теплообмін між краплями, частинками та теплоносієм з урахуванням таких параметрів, як гідродинаміка киплячого шару, передача кінетичної енергії, розсіювання енергії, стиснення крапель з частинками, їх адгезія до поверхні, кінетика висихання розчину, на поверхні частинок.

Чисельно розраховано математичну модель процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з киплячим шаром і встановлено, що для стабілізації температури системі потрібно 38 секунд, температура частинок стабілізується на рівні 381К, а температура крапель при 387К.

Список використаних джерел:

1. Adetayo, A.A., et al. Population balance modelling of drum granulation of materials with wide size distribution. *Powder Technology*. 1995. № 82(1). P. 37-49.
2. Vreman, A.W., van Lare C.E., Hounslow M.J. A basic population balance model for fluid bed spray granulation. *Chemical Engineering Science*. 2009. № 64(21). P. 4389-4398.
3. Syamlal M., Rogers W., O. Brien T. J. MFI Documentation: Volume1, Theory Guide. National Technical Information Service, Springfield, VA. DOE/METC9411004, NTIS/DE94000871993.
4. Gidaspow D., R.B. and J.D. Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach. In *Fluidization VII. Proceeding of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization*. 1992. P. 75-82.
5. Lun C.K.K. et al. Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flow Field. *Journal of Fluid Mechanics*. 1984. № 140. P. 223-256.
6. Kornienko 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). P. 890-900.
7. Korniyenko B., Galata L., Ladieva L. Mathematical model of threats resistance in the critical information resources protection system. Paper presented at the CEUR Workshop Proceedings. 2019. № 2577. P. 281-291.
8. Korniyenko B., Kornienko Y., Haidai S., Liubeka A., Hulienko S. Conditions of Non-uniform Fluidization in an Auto-oscillating Mode. *Advances in Computer Science for Engineering and Manufacturing. ISEM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. № 463. P. 14-27.
9. Korniyenko B., Kornienko 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. P. 28-37.
10. Korniyenko B., Galata L., Ladieva L. Research of Information Protection System of Corporate Network Based on GNS3. 2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory, ATIT 2019 – Proceedings. 2019. № 9030472. P. 244-248. DOI: 10.1109/ATIT49449.2019.9030472
11. 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. № 16 (20). P. 2126-2131.
12. Корнієнко Б.Я. Інформаційні технології оптимального управління виробництвом мінеральних добрив. Київ. 2014. 288 с.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Korniyenko B.Y. Modeling of transport processes in disperse systems. *The Advanced Science Journal*. 2013. № 1. P. 7-10.
17. Корнієнко Б.Я. Мінеральні добрива. Двохфазна модель утворення в грануляторі із псевдозрідженим шаром. *Хімічна промисловість України*. 2013. № 1. С. 39-43.
18. 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.
19. Korniyenko B.Y. Research modes of a fluidized bed granulator. *The Advanced Science Journal*. 2013. № 5. P. 12-15.
20. Корнієнко Б.Я. Ідентифікація процесу гранулювання мінеральних добрив у апараті з псевдозрідженим шаром. *Наукоємні технології*. 2013. № 3(19). С. 280-284.

21. Korniyenko B.Y., Osipa L. Identification of the granulation process in the fluidized bed. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. № 13(14). P. 4365-4370.
22. 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. P. 18-30.
23. 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. P. 307-310.
24. 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). P. 2329-2332.
25. 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. P. 86-88.
26. Корнієнко Б.Я. Мінеральні добрива. Оптимізація процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. *Хімічна промисловість України*. 2013. № 4. С. 69-73.
27. Korniyenko B.Y. Static and dynamic characteristics of transport processes in disperse systems. *Наукоємні технології*. 2013. № 2(18). P. 166-170.
28. Корнієнко Б.Я. Мінеральні добрива. Статична оптимізація процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. *Хімічна промисловість України*. 2013. № 5. С. 36-40.
29. Корнієнко Б.Я. Ідентифікація процесу гранулювання мінеральних добрив у апараті з псевдозрідженим шаром. *Наукоємні технології*. 2013. № 3(19). С. 280-284.
30. 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.
31. 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). P. 2203-2210.
32. 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. P. 176-187.
33. Корнієнко Б.Я. Дослідження моделі взаємодії відкритих систем з погляду інформаційної безпеки. *Наукоємні технології*. 2012. № 3(15). С. 83-89.
34. Korniyenko B., Yudin O., Novizkij E. Open systems interconnection model investigation from the viewpoint of information security. *The Advanced Science Journal*. 2013. № 8. P. 53-56.
35. Zhulynskyi 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. P. 3108-3112.
36. Bieliatynskyi A., Osipa L., Korniyenko B. Water-saving processes control of an airport. Paper presented at the MATEC Web of Conferences. 2018. № 239.
37. Korniyenko B., Zabolotnyi V., Galata L. The Optimization of the Critical Resource Protection System of a Mineral Fertilizers Manufacturing Facility. *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS 2021*. 2021. № 1. P. 172-178.
38. Babak V.P., Babak S.V., Myslovych M.V., Zaporozhets A.O., Zvaritch V.M. Methods and models for information data analysis. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2021. № 281. P. 23-70. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3_2
39. Mikhail Polishchuk, Mikhail Tkach, Igor Parkhomey, Juliy Boiko, Oleksander Eromenko. Experimental Studies on the Reactive Thrust of the Mobile Robot of Arbitrary Orientation. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics*. 2020. № 8(2). P. 340-352.
40. Kandra Deka. Modeling of Air Temperature using ANFIS by Wavelet Refined Parameters. *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*. 2016. № 8(1). P.25-34. DOI: 10.5815/ijisa.2016.01.04
41. Javad Ghiasi-Freez, Amir Hatampour, Payam Parvasi. Application of Optimized Neural Network Models for Prediction of Nuclear Magnetic Resonance Parameters in Carbonate Reservoir Rocks. *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*. 2015. №.7(6). P. 21-32. DOI: 10.5815/ijisa.2015.06.02
42. Milad Malekzadeh, Alireza Khosravi, Abolfazl Ranjbar Noei, Reza Ghaderi. Application of Adaptive Neural Network Observer in Chaotic Systems. *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*. 2014. № 6(2). P. 37-43. DOI: 10.5815/ijisa.2014.02.05

References:

1. Adetayo, A.A., et al. (1995). Population balance modelling of drum granulation of materials with wide size distribution. *Powder Technology*. 82(1). 37-49.
2. Vreman, A.W., C.E. van Lare, and M.J. Hounslow (2009). A basic population balance model for fluid bed spray granulation. *Chemical Engineering Science*. 64(21). 4389-4398.
3. M. Syamlal, W. Rogers, and O. Brien T. J. (1993). MFI Documentation: Volume1, Theory Guide. *National Technical Information Service*. Springfield. VA. DOE/METC9411004, NTIS/DE94000871993.
4. Gidaspow D., R.B. and J.D. (1992). Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach. In *Fluidization VII. Proceeding of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization*. 75-82.
5. Lun, C.K.K., et al. (1984). Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flow Field. *Journal of Fluid Mechanics*. 140. 223-256.

6. Kornienko Y.M., Haidai S.S., Sachok R.V., Liubeka A.M., Korniyenko B.Y. (2020). Increasing of the heat and mass transfer processes efficiency with the application of non-uniform fluidization. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 15(7). 890-900.
7. Korniyenko B., Galata L., Ladieva L. (2019). Mathematical model of threats resistance in the critical information resources protection system. *Paper presented at the CEUR Workshop Proceedings*. 2577. 281-291.
8. Korniyenko B., Kornienko Y., Haidai S., Liubeka A., Hulienko S. Conditions of Non-uniform Fluidization in an Auto-oscillating Mode. *Advances in Computer Science for Engineering and Manufacturing. ISEM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. 463. 14-27.
9. Korniyenko B., Kornienko 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*. 463. 28-37.
10. Korniyenko B., Galata L., Ladieva L. Research of Information Protection System of Corporate Network Based on GNS3. *2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory, ATIT 2019 – Proceedings*. 9030472. 244-248. DOI: 10.1109/ATIT49449.2019.9030472
11. 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*. 16 (20). 2126-2131.
12. Korniyenko B.Y. (2014). Informatsiini tekhnolohii optimalnogo upravlinnia vyrobnytstvom mineralnykh dobryv [Information technologies for optimal management of mineral fertilizer production], 288.
13. Korniyenko B.Y. (2013). The two phase model of formation of mineral fertilizers in the fluidized-bed granulator. *The Advanced Science Journal*, 4, 41-44.
14. Korniyenko B.Y. (2012). Dvokhfazna model protsesu znevodnennia ta hranuliuвання u psevdozridzhenomu shari [Two-phase model of the process of dehydration and granulation in a fluidized bed]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut», Seriya «Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia», 2(10), 31-35.*
15. Korniyenko B.Y. (2012). Matematychni modeliuvannia dynamiky protsesiv perenosu pry znevodnenni ta hranuliuванні u psevdozridzhenomu shari [Mathematical modeling of the dynamics of transfer processes during dehydration and granulation in a fluidized bed]. *Naukovyi zhurnal «Visnyk Natsionalnoho aviatychnoho universytetu», 4(53), 84-90.*
16. Korniyenko B.Y. (2013). Modeling of transport processes in disperse systems. *The Advanced Science Journal*, 1, 7-10.
17. Korniyenko B.Y. (2013). Mineralni dobryva. Dvokhfazna model utvorennia v hranuliatori iz psevdozridzhenym sharom [Mineral fertilizers. Two-phase model of formation in a fluidized bed granulator]. *Khimichna promyslovisht Ukrainy*, 1, 39-43.
18. Korniyenko B.Y., Ladieva L.R., Snihur O.V. (2013). Hranuliuвання u psevdozridzhenomu shari. Doslidzhennia determinovanoho khaosu protsesu [Granulation in a fluidized bed. Study of deterministic process chaos]. *Khimichna promyslovisht Ukrainy*, 2, 20-23.
19. Korniyenko B.Y. (2013). Research modes of a fluidized bed granulator. *The Advanced Science Journal*, 5, 12-15.
20. Korniyenko B.Y. (2013). Identyfikatsiia protsesu hranuliuвання mineralnykh dobryv u aparati z psevdozridzhenym sharom [Identification of the granulation process of mineral fertilizers in a fluidized bed apparatus]. *Naukoiemni tekhnolohii*, 3(19), 280-284.
21. Korniyenko B.Y., Osipa L. (2018). Identification of the granulation process in the fluidized bed. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(14), 4365-4370.
22. Korniyenko B., Ladieva L. (2021). Mathematical Modeling Dynamics of the Process Dehydration and Granulation in the Fluidized Bed. *Advances in Intelligent Systems and Computing. 1247 AISC*, 18-30.
23. Korniyenko B., Ladieva L., Galata L. (2020). 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*, 9349344, 307-310.
24. Korniyenko B.Y., Borzenkova S.V., Ladieva L.R. (2019). Research of three-phase mathematical model of dehydration and granulation process in the fluidized bed. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14(12), 2329-2332.
25. Korniyenko B.Y., Ladieva L.R. (2019). Mathematical modeling dynamics of the process dehydration and granulation in the fluidized bed. *Intelektualni systemy pryiniattia rishen i problemy obchysluvalnoho intelektu*, 86-88.
26. Korniyenko B.Y. (2013). Mineralni dobryva. Optymizatsiia protsesu znevodnennia ta hranuliuвання u psevdozridzhenomu shari [Mineral fertilizers. Optimization of the process of dehydration and granulation in a fluidized bed]. *Khimichna promyslovisht Ukrainy*, 4, 69-73.
27. Korniyenko B.Y. (2013). Static and dynamic characteristics of transport processes in disperse systems. *Naukoiemni tekhnolohii*, 2(18), 166-170.
28. Korniyenko B.Y. (2013). Mineralni dobryva. Statychna optymizatsiia protsesu hranuliuвання u psevdozridzhenomu shari [Mineral fertilizers. Static optimization of the granulation process in a fluidized bed]. *Khimichna promyslovisht Ukrainy*, 5, 36-40.
29. Korniyenko B.Y. (2013). Identyfikatsiia protsesu hranuliuвання mineralnykh dobryv u aparati z psevdozridzhenym sharom [Identification of the granulation process of mineral fertilizers in a fluidized bed apparatus]. *Naukoiemni tekhnolohii*, 3(19), 280-284.
30. Korniyenko B.Y. (2013). Zadachi optymizatsii znevodnennia ta hranuliuвання mineralnykh dobryv u psevdozridzhenomu shari [Problems of optimization of dehydration and granulation of mineral fertilizers in a fluidized bed]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut», Seriya «Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia», 1(12), 28-31.*

31. Kornienko Y.M., Liubeka A.M., Sachok R.V., Korniyenko B.Y. (2019). Modeling of heat exchangement in fluidized bed with mechanical liquid distribution. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14(12), 2203-2210.
32. Korniyenko B., Galata L., Ladieva L. (2018). 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)*, 2318, 176-187.
33. Korniyenko B.Y. (2012). Doslidzhennia modeli vzaiemodii vidkrytykh system z pohliadu informatsiinoi bezpeky [Study of the interaction model of open systems from the point of view of information security]. *Naukoiemni tekhnolohii*, 3 (15), 83-89.
34. Korniyenko B., Yudin O., Novizkij E. (2013). Open systems interconnection model investigation from the viewpoint of information security. *The Advanced Science Journal*, 8, 53-56.
35. Zhulynskiy A.A., Ladieva L.R., Korniyenko B.Y. (2019). Parametric identification of the process of contact membrane distillation. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences Volume 14*, 17, 3108-3112.
36. Bieliatynskiy, A., Osipa, L., Kornienko, B. (2018). Water-saving processes control of an airport. *Paper presented at the MATEC Web of Conferences*, 239.
37. Korniyenko B., Zabolotnyi V., Galata L. The Optimization of the Critical Resource Protection System of a Mineral Fertilizers Manufacturing Facility. *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS 2021*. 1. 172-178.
38. Babak V.P., Babak S.V., Myslovych M.V., Zaporozhets A.O., Zvaritch V.M. (2021). Methods and models for information data analysis. *Studies in Systems, Decision and Control*. 281. 23-70. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3_2
39. Mikhail Polishchuk, Mikhail Tkach, Igor Parkhomey, Juliy Boiko, Oleksander Eromenko. Experimental Studies on the Reactive Thrust of the Mobile Robot of Arbitrary Orientation. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics*. 8(2). 340-352.
40. Kandra Deka,(2016). Modeling of Air Temperature using ANFIS by Wavelet Refined Parameters. *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*. 8(1). 25-34. DOI: 10.5815/ijisa.2016.01.04
41. Javad Ghiasi-Freez, Amir Hatampour, Payam Parvasi (2015). Application of Optimized Neural Network Models for Prediction of Nuclear Magnetic Resonance Parameters in Carbonate Reservoir Rocks. *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*. 7(6). 21-32. DOI: 10.5815/ijisa.2015.06.02
42. Milad Malekzadeh, Alireza Khosravi, Abolfazl Ranjbar Noei, Reza Ghaderi (2014). Application of Adaptive Neural Network Observer in Chaotic Systems. *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*. 6(2). 37-43. DOI: 10.5815/ijisa.2014.02.05