

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет інформатики та обчислювальної техніки
Кафедра автоматики та управління в технічних системах

«На правах рукопису»

УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ___ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності _____ 126 Інформаційні системи та технології _____

на тему: _____ «Система управління виробництвом мінеральних добрив» _____

Виконав: студент 2-го курсу, групи _____ ІА-82мп _____
(шифр групи)

_____ Сопільняк Олександр Анатолійович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник проф. каф. АУТС, д. т. н., доцент Корнієнко Б. Я. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

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

Факультет _____ інформатики та обчислювальної техніки
(повна назва)

Кафедра _____ автоматики та управління в технічних системах
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність _____ 126 Інформаційні технології та системи
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Ролік О. І.
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 2019 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Сопільняку Олександрю Анатолійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Система управління виробництвом мінеральних добрив» _____

науковий керівник дисертації _____ Корнієнко Богдан Ярославович,
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

проф. кафедри АУТС, д. т. н., доцент _____

затверджені наказом по університету від «_____» _____ 2019 р. № _____

2. Строк подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження _____ процес зневоднення та виробництва гранул _____

4. Предмет дослідження _____ математична модель гранулятора, система управління
виробництвом мінеральних добрив _____

5. Перелік завдання, які потрібно розробити _____ дослідити процес грануляції у
грануляторі із псевдозврдженим шаром, провести огляд та аналіз аналогів, розробити
математичну модель гранулятора, дослідити математичну модель на адекватність,
розробити систему управління гранулятором _____

6. Орієнтовний перелік ілюстративного (графічного) матеріалу: графіки, блок-схема, схеми управління

7. Орієнтовний перелік публікацій: «PERSPEKTYWICZNE OPRACOWANIA SA NAUKĄ I TECHNIKAMI - 2019», «WYKSZTAŁCENIE I NAUKA BEZ GRANIC - 2019»

8. Консультанти розділів дисертації _____

9. Дата видачі завдання – 05.09.2019

Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання магістерської дисертації | Строк виконання етапів дисертації | Примітка |
|-------|---|-----------------------------------|----------|
| 1. | Отримання завдання | 05.09.2019 | |
| 2. | Дослідження процесу грануляції у грануляторі | 09.10.2019 | |
| 3. | Дослідження процесу зневоднення у грануляторі | 18.10.2019 | |
| 4. | Розробка математичної моделі процесу грануляції | 01.11.2019 | |
| 5. | Перевірка математичної моделі на адекватність | 13.11.2019 | |
| 6. | Розробка системи управління | 24.11.2019 | |
| 7. | Розробка стартап–проекту | 29.11.2019 | |
| 8. | Оформлення пояснювальної записки | 02.12.2019 | |

Студент

Науковий керівник дисертації

Сопільняк О. А.

(ініціали, прізвище)

Корнієнко Б. Я.

(ініціали, прізвище)

(підпис)

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Мінеральні добрива у вигляді гранул на сьогодні є самим популярним та ефективним видом добрив в аграрній сфері України. В період з 2013 до 2018 року виробництво добрив знизилося з 3474.6 тис. тон до 1404.2 тис. тон. Таке зниження об'ємів виробництва зумовлено тим, що підприємства суттєво залежать від постачання імпортованого газу та його ціни, так як процес виробництва є досить енергозатратний. Підвищення ціни на газ призводить до підвищення ціни на добриво та зниження її конкурентоспроможності. Тому актуальною задачею є підвищення енергоефективності процесу виробництва гранул, шляхом розробки ефективних систем управління.

Магістерська дисертація присвячена розробці системи управління виробництва мінеральних добрив, а саме управління температурою гранул, так як саме цей процес є ключовим у виробництві гранул. Основними завданнями, що вирішувалися в процесі написання магістерської дисертації були: дослідження процесу грануляції у грануляторі із псевдозрідженим шаром, огляд аналогів та існуючих систем, розробка математичної моделі процесу грануляції та розробка системи управління процесом грануляції.

У магістерській дисертації об'єктом дослідження є процес зневоднення та виробництва гранул.

Предметом дослідження є математична модель гранулятора із псевдозрідженим шаром та система управління виробництвом мінеральних добрив.

Методи дослідження, що використовувалися під час написання магістерської дисертації: метод Рунге-Кутти для дослідження адекватності математичної моделі, пакет Simulink, PID Tuner та System Identification Toolbox програмного забезпечення Matlab для розробки системи управління.

За результатами досліджень теми магістерської дисертації опубліковано тезисні доповіді на 2 міжнародних конференціях.

Пояснювальна записка до магістерської дисертації має обсяг 109 сторінок та містить 37 рисунків, 22 таблиці, 27 літературних джерел.

Результати роботи можуть бути використані та впроваджені в системах управління процесом зневоднення та виробництва гранул у грануляторі із псевдозрідженим шаром. Розроблені в програмному пакеті Matlab схеми систем управління можуть бути використані в курсі «Спеціальні розділи теорії автоматичного керування».

Ключові слова: СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, ГРАНУЛЯТОР, МІНЕРАЛЬНІ ДОБРИВА, ПСЕВДОЗРІДЖЕНИЙ ШАР, ПІ-РЕГУЛЯТОР, ПІД-РЕГУЛЯТОР, ЗНЕВОДНЕННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГРАНУЛЯТОРА, ВОЛОГОВМІСТ ГРАНУЛ.

ABSTRACT

Mineral fertilizers in the form of granules is today the most popular and effective type of fertilizer in the agricultural sector of Ukraine. In the period from 2013 to 2018, fertilizer production decreased from 3474.6 thousand tons to 1404.2 thousand tons. This decline in production is due to the fact that enterprises are significantly dependent on the supply of imported gas and its price, since the production process is quite energy-intensive. An increase in gas prices leads to an increase in the price of fertilizer and a decrease in its competitiveness. Therefore, the urgent task is to increase the energy efficiency of the pellet production process by developing effective control systems.

The master's thesis is devoted to the development of a control system for the production of mineral fertilizers, namely, temperature control of granules, since this process is key in the production of granules. The main tasks that were solved during the writing of the master's thesis: research of the granulation process in a granulator with a fluidized bed, a review of analogues and existing systems, the development of a mathematical model of the granulation process and the development of a granulation process control system.

In the master's thesis, the object of research is the process of dehydration and production of granules.

The subject of the study is the mathematical power of a fluidized bed granulator and a system for controlling the production of mineral fertilizers.

Research methods used in the writing of the master's thesis: Runge-Kutta method for mathematical model adequacy, Simulink package, PID Tuner Matlab and System Identification Toolbox software for control system development.

As a result of the research of the topic of the master's thesis theses were published at 2 international conferences.

The explanatory note for the master's thesis has a volume of 109 pages and contains 37 drawing, 22 tables, 27 literary sources.

The results of the work can be used and implemented in the systems of control of the process of dehydration and production of granules in a fluidized bed granulator. The schemes of control systems developed in the Matlab software package can be used in the course "Special sections of theory of automatic control".

Keywords: CONTROL SYSTEM, GRANULATOR, MINERAL FERTILIZERS, FLUIDISED BED, PI-CONTROLLER, PID-CONTROLLER, DEHYDRATION, MATHEMATICAL MODEL OF GRANULATOR, MOISTURE OF GRANULES.

ЗМІСТ

| | |
|---|-----------|
| ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ | 10 |
| ВСТУП..... | 11 |
| 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗНЕВОДНЕННЯ ТА ГРАНУЛЮВАННЯ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ..... | 13 |
| 1.1 Актуальність використання процесів псевдозрідження | 13 |
| 1.2 Огляд принципів та застосувань процесів кристалізації та грануляції | 16 |
| 1.3 Процес грануляції у грануляторі із псевдозрідженим шаром | 19 |
| 1.4 Процес грануляції з киплячим шаром | 22 |
| 1.5 Процес грануляції розпиленням..... | 24 |
| 2. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ..... | 25 |
| 2.1 Модель балансу популяції | 25 |
| 2.2 Трьохступінчата модель балансу популяції..... | 28 |
| 2.3 Трьохфазна математична модель | 31 |
| 2.4 Двох компонентна модель балансу популяції | 34 |
| 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗНЕВОДНЕННЯ ТА ГРАНУЛЮВАННЯ..... | 37 |
| 3.1 Характеристика математичної моделі | 37 |
| 3.2 Методи дослідження адекватності математичної моделі | 40 |
| 3.2.1 Метод Ейлера..... | 40 |
| 3.2.2 Метод Рунге –Кутти | 42 |
| 3.2.3 Метод Монте – Карло | 45 |
| 3.3 Дослідження адекватності математичної моделі..... | 47 |
| 3.4 Результати дослідження..... | 54 |
| 4 СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ГРАНУЛЯЦІЇ | 60 |
| 4.1 Передавальна функція об’єкта управління | 63 |
| 4.2 Система управління з ПІ – регулятором | 71 |
| 4.3 Система управління з ПІД – регулятором..... | 77 |
| 5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ | 83 |
| 5.1 Опис ідеї стартап – проекту..... | 83 |
| 5.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик | 85 |
| 5.3 Технологічний аудит ідеї проекту | 86 |
| 5.4 Характеристика потенційних клієнтів..... | 87 |
| 5.5 Фактори загроз та можливостей..... | 88 |
| 5.6 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку | 90 |
| 5.7 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером | 92 |
| 5.8 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності | 98 |

| | |
|---|------------|
| 5.9 SWOT – аналіз стартап – проекту | 99 |
| 5.10 Альтернативи ринкового впровадження стартап – проекту | 100 |
| 5.11 Вибір цільових груп потенційних споживачів | 101 |
| 5.12 Визначення базової стратегії розвитку | 102 |
| 5.13 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки | 103 |
| 5.14 Розроблення маркетингової програми стартап – проекту | 103 |
| 5.15 Концепція маркетингових комунікацій | 104 |
| ВИСНОВКИ..... | 105 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 107 |

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ТСМБП – трьох ступінчата модель балансу популяції

ДКМБП – двокомпонентна модель балансу популяції

ODE – звичайне диференціальне рівняння

МБП – модель балансу популяції

SIT – System Identification Toolbox

МК – метод Монте-Карло

ПІ – пропорціонально-інтегральний регулятор

ПІД – пропорціонально-інтегрально-диференційний регулятор

ВСТУП

Україна є однією із найбільших аграрних країн Європи. Український агросектор є провідною галуззю економіки з добре розвиненою структурою бізнесу та великими перспективами інвестування. Основну частку ринку складає вирощування зернових культур і тому важливим питанням є забезпечення зростання врожайності зернових культур. Для підвищення врожайності, необхідно підвищити кількість поживних речовин у ґрунті. Це досягається внесенням мінеральних добрив.

Одним із найпоширеніших методів виготовлення мінеральних добрив є грануляція. Добрива у вигляді гранул мають ряд переваг перед звичайними добрива у вигляді порошку чи рідини, а саме, легкість у транспортуванні, добре засвоюються та менше піддаються вивітрюванню із ґрунту, зручні у застосування.

Щоб отримати тверді частинки з рідкого вихідного матеріалу такого як: розчини, емульсії чи суспензії, застосовують такі процеси як: кристалізація, грануляція, сушка розпиленням.

Кристалізація і грануляції є складними динамічними процесами, що включають кілька фаз (рідина і тверда речовина), тепло – і масообмін між цими фазами, а також процеси формування частинок.

Один із процесів, який часто використовується у фармацевтичній галузі, галузі виробництва продуктів харчування та добрив – це грануляція у псевдозрідженому шарі. Це дозволяє одержувати без пильні, вільно текучі частинки з рідкої сировини: суспензія (або розчин) розпорошується на частинки в технологічній камері і завдяки висушуванню – шар псевдозріджується гарячим повітрям – рідина випаровується. Тверда речовина, що залишилась створює новий шар твердого матеріалу на частинках.

Крім того, грануляція розпиленням може проводитися як в періодичному, так і в безперервному режимі, процеси сушіння і утворення частинок можуть поєднуватися і виконуватися одночасно в одному пристрої. Конструкція апаратів для

процесу грануляції проста, та через високі показники тепло перенесення та масо перенесення з'являється можливість спроектувати компактні установки для грануляції в порівнянні з іншими технологіями. У промислових масштабах, для процесу грануляції необхідна велика кількість енергоресурсів, а саме природнього газу, який використовується для нагрівання повітря у технологічній камері. Зменшення використовуваного газу для процесу грануляції хоча б на 10 – 15% при сталих показниках якості продукту дозволило б значно підвищити ефективність процесу грануляції та значно зменшити витрати на виробництво. Одним із важливих етапів вирішення проблеми – створення математичної моделі процесу, яка повинна коректно відображати всі етапи процесу грануляції.

Тому завданням магістерської дисертації є розробка математичної моделі яка дасть можливість створити енергоефективну систему управління процесом грануляції, яка буде підтримувати температуру гранул на заданому рівні на протязі всього процесу, порівняти результати роботи системи управління з різними регуляторами та обрати ту, при яких система управління буде кращою.

1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗНЕВОДНЕННЯ ТА ГРАНУЛЮВАННЯ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

1.1 Актуальність використання процесів псевдозрідження

Основні види всіх промислово перероблених товарів існують у вигляді твердих речовин. Якщо переходити від терміну "частинка" в своєму класичному значенні до, термінів розчин, суспензія, аерозоль або газова бульбашок у рідині, то три четверті всіх перероблених товарів будуть входити в цю категорію .

Можна виділити значну кількість прикладів твердих продуктів із життя: молочний порошок, перемелена та смажена кава, порошок розчинного какао та цукор. Крім того, тверді частинки відіграють важливу роль в інших сферах: охорона здоров'я у формі діючого фармацевтичного інгредієнта, в аграрній промисловості у вигляді добрив або в хімічній промисловості у вигляді каталізаторів.

Тверді продукти у вигляді порошків, виготовлених з рідкої сировини, мають багато переваг: наприклад, вони краще підлягають транспортуванню, збереженню та переробці. Чудовим прикладом є молоко: у рідкому вигляді його потрібно постійно зберігати в прохолоді, щоб не зіпсувалося. Однак якщо його висушити за допомогою процесу розбризкування, тобто видалити воду з емульсії сушкою, воно може зберігатися при кімнатній температурі протягом тривалого часу. Рідкий стан можна легко відновити в будь – який час, просто додавши води в порошок.

Властивості продукту часто можна характеризувати властивостями частинок, а точніше властивості частинок впливають на властивості продукту. Нижче наведено перелік важливих властивостей частинок:

- розмір та форма частинок;
- пористість частинки;
- вміст вологи в частинці;
- температура частинок.

Розмір і форма частинок визначають, здатність порошку до текучості. Якщо частинки порошку занадто малі, то сили між частинками перешкоджають вільному процесу текучості. Як приклад даного процесу можна порівняти цукровий порошок і кристалічний цукор. Хоча обидва продукти виробляються із цукру, цукровий порошок тече не так швидко як кристалічний цукор через те, що його частинки значо меншого розміру. Якщо розглядати питання безпеки, то розмір частинок також має велике значення. Якщо продукт виробництва виготовляється з токсичного матеріалу, а пил, що утворюється, потрапляє в навколишню середу, відповідно виникає небезпека, погіршення стану здоров'я людини через вдихання токсичних речовин з повітрям.

З точки зору екології, виділення гербіцидного пилу може призвести до загибелі основних комах, які споживають дуже дрібні частинки. Крім того, дуже дрібні порошки становлять небезпеку вибуху, якщо вони будуть диспергуванні в газоподібному середовищі.

Крім цих аспектів, розмір частинок також може впливати на ефективність продукту, наприклад у фармацевтиці. В цьому випадку може стояти завдання виробництва таблетки із заздалегідь визначеним ступенем розчиненням, характерним для діючої речовини. Товщина нанесеного шару покриття на діючу речовину також впливає на цю характеристику, це робиться для того, щоб захистити діючу речовину від соляної кислоти у шлунку. Ефективність діючої речовини сильно залежить від якості зовнішню шару покриття таблетки: якщо він занадто тонкий, діюча речовина стає активнішою ще до досягнення бажаного призначення наприклад шлунку, якщо він занадто густий, він може зовсім не розчинитися.

На властивості продукту також сильно впливає пористість частинки. Якщо її пористість досить велика, то вона може мати досить низьку стійкість до зберігання, тобто частинка може розсипатися та зруйнуватися в результаті дії інших сил, наприклад, під вагою інших частинок. Це призводить до появи пилоподібних частинок на дні контейнера для зберігання, також впливає на ефективність продукту.

Як було сказано вище, у фармацевтичній галузі мета полягає у виробництві продукту із заздалегідь визначеною характеристикою розчину. Якщо частинка занадто пориста, то активна речовина може вивільнитися занадто швидко, що може призвести до передозування, якщо вона занадто компактна, вивільнення може бути занадто повільним, а діюча речовина може мати лише дуже обмежений ефект.

Вологовміст та її температура досить сильно впливає на здатність до транспортування та зберігання продукту. Якщо вміст води в виготовленому продукті значний, він може злипатися, тобто утворювати частки великого розміру, які більше не можна використовувати. Одним із прикладів є виробництво цукру: Якщо цукор поміщають в бункер з дуже високою вологістю і температурою, він буде утворювати при охолодженні – частинки з розміром бункера в гіршому випадку. Для запобігання злипанню продукту часто необхідна постійна сушка та охолодження. Ці два процеси вимагають великих витрат енергії, що в свою чергу впливає на собівартість продукції.

Також, великий вплив на пористість виготовленої продукції мають вологість та температура під час процесу виробництва. На рисунку 1.1 показано як утворюються частинки з різною пористістю. Залежно від специфікацій продукту, волога частинок і газу, а також температура повинні регулюватися, щоб продукт відповідав бажаним характеристикам.

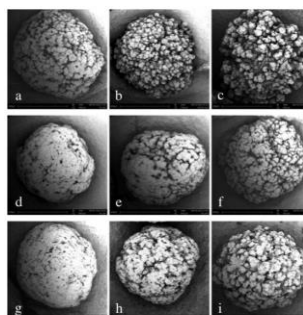


Рисунок 1.1 – Вплив вологості та температури процесу на кінцеву структуру частинок

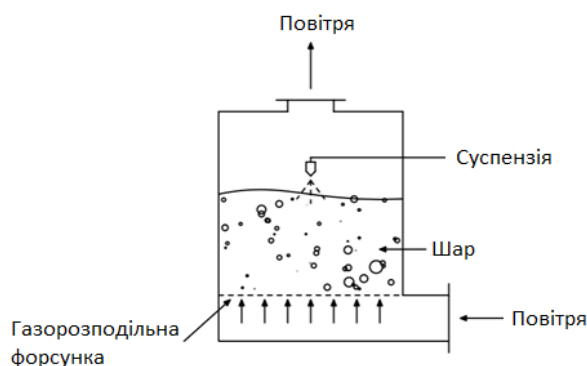
1.2 Огляд принципів та застосувань процесів кристалізації та грануляції

Щоб отримати тверді частинки з рідкого матеріалу наприклад розчину, емульсії чи суспензії, існують різні процеси, наприклад кристалізація, грануляція та сушка розпиленням. Вони можуть бути додатково спеціалізовані залежно від характерного ефекту, який використовується для трансформації, наприклад охолодження кристалізації або грануляції розпилення.

Кристалізація і грануляції є складними динамічними процесами, що включають в себе кілька фаз, таких як рідина або тверда речовина, теплообмін та масообмін між цими фазами, а також процеси формування частинок.

Один із процесів, який часто використовується у фармацевтичній галузі, галузі виробництва продуктів харчування та добрив – це грануляція у псевдозрідженому шарі.

Цей процес дозволяє одержувати безпильні, вільно текучі частинки з рідкої сировини – суспензії, яка розпорошується на частинки в технологічній камері і завдяки висушуванню – шар псевдозріджується гарячим повітрям – рідина випаровується. Тверда речовина, що залишилась створює новий шар твердого матеріалу на частинках. Спрощена схема цього процесу грануляції показана на рисунку 1.2.



Рисунку 1.2 – Спрощена схема процесу грануляції в грануляторі із псевдозрідженим шаром

Грануляція – це процес агломерації тонкодисперсних порошкових матеріалів для отримання більш крупніших гранул, шляхом сухої грануляції та мокрої грануляції, з яких процес вологої грануляції відбувається шляхом додавання в порошок сполучного розчину є одним з найпоширеніших способів отримання гранул. Процес вологої грануляції може виконуватися за допомогою різного технологічного обладнання, включаючи барабани, каструлі, киплячі шари та змішувачі з високим зсувом, які наведені на рисунку 1.3.

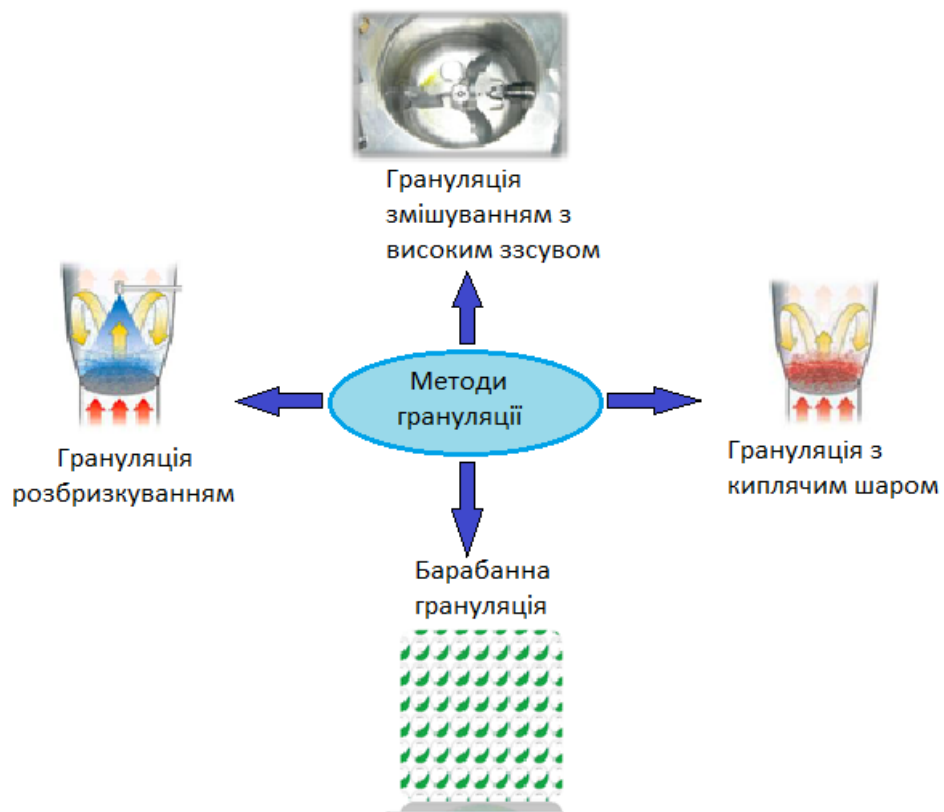


Рисунок 1.3 – Методи вологої грануляції

Із наведених вище способів мокрої грануляції, які показані на рисунку 1.3 грануляційним розпиленням із псевдозрідженим шаром часто використовуваний на добре відомий спосіб отримання гранул шляхом розпилення сполучного розчину по твердому порошку в псевдозрідженому шарі. Основна перевага цього методу полягає

в тому, що декілька етапів можна виконувати, порівняно з іншими методами, в одному і тому ж пристрої, включаючи попереднє змішування твердого порошку, грануляцію з відповідним рідким сполучним розчином з подальшим сушінням гранул до задалегідь встановленого рівню вологості. Крім того, ця методика має ряд переваг в порівнянні з іншими методами, наприклад, висока швидкість теплопередачі та масопередачі, рівномірний розподіл полуного розчину та контроль частинок. Зважаючи на вищезгадані переваги, процес грануляції у грануляторі із псевдозрідженим шаром широко застосовується у фармацевтичній, харчовій та хімічній промисловості і має довгу історію понад 40 років. У наступні десятиліття процес грануляції псевдозрідженим шаром досліджували ширше, що призвело до появи різних математичних моделей що моделювали даних процес.

Грануляція – це важливий процес у ряді галузей промисловості, включаючи сільськогосподарські хімікати, фармацевтичні препарати, переробку мінеральних речовин, харчові продукти та миючі засоби.

При практичному застосуванні процесу грануляції (утворення частинок) виникає наступна проблема: частинки не є однорідними, тобто відрізняються за своїми властивостями, наприклад, за розміром, формою або кольором. Це означає, що частинки порошку мають розподіл за своїми властивостями, і тому продукт також має властивість розподілу. Враховуючи специфікацію товару, тоді потрібно, щоб виготовлений продукт задовольняв встановлені специфікації, що приймаються замовником.

Специфікації продукту можуть бути дуже суворими, наприклад, в процесах з дорогою сировиною або коли продукт являє собою небезпечну для життя речовину, специфікації продукту сягаю досить високого рівню. Необхідність гарантування, що продукт відповідає встановленим специфікаціям, мотивує використання систем управління процесами в процесах виготовлення частинок. Сьогодні практично впроваджені системи управління в основному концентруються на регулюванні процесу тепло та масоперенесення (наприклад, вологості і температури продукту) і інтегральних значеннях(наприклад, загальної маси продукту) або середніх значеннях

(наприклад, середнього розміру частинок) частинок. Хоча схеми управління здебільшого задовольняють вимоги, які перед ними поставлені, вони не можуть гарантувати, що розподіл властивостей в цілому відповідає специфікаціям. Це означає, що в світлі зростаючої суворості специфікацій продуктів системи контролю виробництвом повинні бути покращені.

1.3 Процес грануляції у грануляторі із псевдозрідженим шаром

Розглянемо технологічну камери з розподільною решіткою на дні, яка може пропускати потік рідини або газу. У верхній частині розподільної пластини ущільнений шар, тобто частки в стані спокою. На рисунку 1.4(а) показано нерухомий шар із середньою пористістю f . Далі потік рідини подається до апарату через розподільну форсунку. Якщо буде досягнута певна швидкість масового потоку, що відповідає швидкості рідини, будемо спостерігати ослаблення шару і частинки всередині шару зависають і безладно рухаються. Цей стан називається киплячим шаром та зображено на рисунку 1.4(б). Мінімальна швидкість, необхідна для досягнення даного стану, називається мінімальною швидкістю псевдозрідження.

Також можна спостерігати розширення висоти шару порівняно з початковим нерухомим шаром та зміну пористості. Подальше збільшення потоку рідини впливає на подальше розширення шару та інтенсивне перемішування частинок у шарі, що можна побачити на рисунку 1.4(в). Макроскопічно, частинки поводяться як рідина в цьому стані. Якщо потік рідини додатково збільшується, в якийсь момент частинки починають транспортуватися з потоком рідини. Цей стан називається пневматичним транспортуванням або елютріацією частинок, відповідно швидкість рідини називається швидкістю елютріації (рисунок 1.4(г)). Діапазон існування для псевдозрідженого шару визначається двома граничними швидкостями: він починається з мінімальної швидкості, псевдозрідження та закінчується швидкістю елютріації.

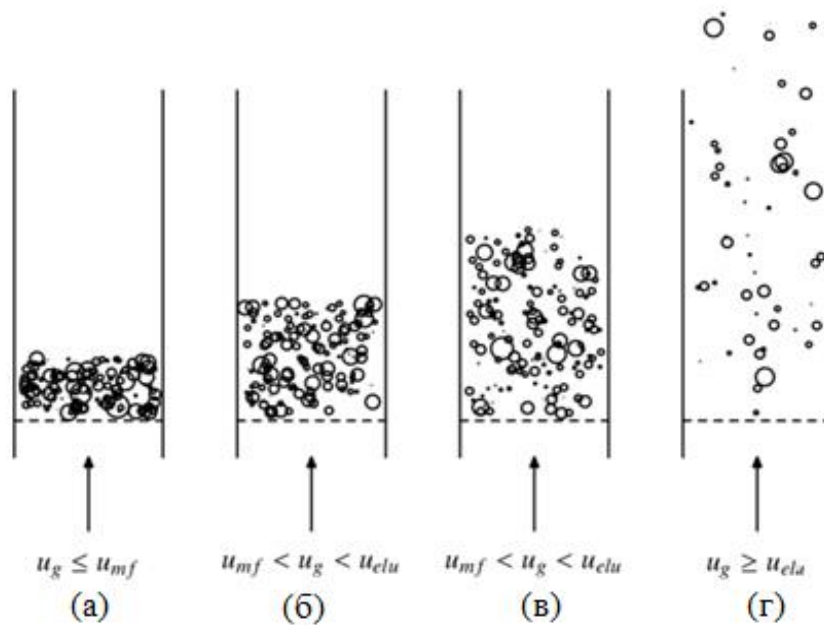


Рисунок 1.4 – Різні стадії киплячого шару: (а) нерухомий, (б) киплячий, (в) псевдозріджений, (г) елютріація

Можна виділити два параметри, масову щільність і діаметр частинок в шарі та чотири групи, що зображені рисунку 1.5.

Класифікація за поведінкою псевдозрідженого шару:

- Група А: частинки, які лежать в діапазоні 50 – 200 мкм та масової щільності в межах від 700 до 1400 кгм. Ці частинки легко піддаються псевдозрідженню, але має місце сильне розширення шару. Також, в псевдозрідженому шарі накопичуються газові бульбашки які важко контролювати;
- Група В: частинки, які лежать в діапазоні 40 – 500 мкм та мають масову щільність 1400 – 4000 кгм. Ці частинки краще всього підходять для використання у псевдозрідженому шарі. Хоч тут і утворюються газові бульбашки, їх кількість залежить лише від швидкості рідини яку можна легко контролювати;

- Група С: Частинки розміром менше 50 мкм потрапляють до цієї групи. Вони дуже важко піддаються псевдозрідженню через великі сили зчеплення між частинками;
- Група D: Частинки з дуже великим розміром або з дуже високою масовою щільністю потрапляють до цієї групи. Вони досить важко піддаються псевдозрідженню за описаними вище налаштуваннями, але можуть досить добре псевдозріджуватись в модифікованому апараті з текучим шаром.

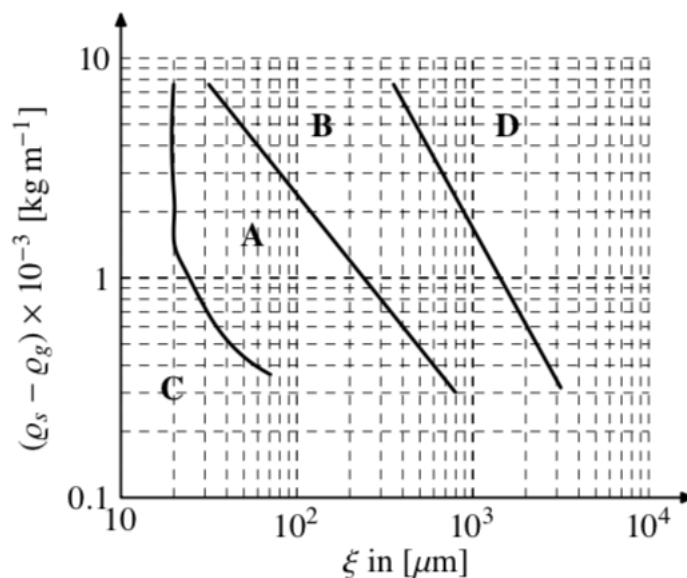


Рисунок 1.5 – Класифікація частинок на чотири групи залежно від поведінки їх псевдозрідження

Існує кілька типів систем з псевдозрідженим шаром:

- газостійкі киплячі шари;
- рідко – тверді киплячі шари.

Щоб використовувати псевдозріджені шари частинок різних розмірів, технологічна камера розширена зверху. Це призводить до зниження швидкості рідини і дозволяє частинкам до певного розміру повертатися назад в технологічну камеру, тим самим зменшуючи кількість матеріалу що вимивається. Розширення технологічного

обладнання має велике значення для псевдозрідженого шару з дуже широким діапазоном розмірів, оскільки мінімальна швидкість псевдозрідження і швидкість елютріації залежать від розміру частинок, може статися так, що для деяких розмірів частинок швидкість елютріації вже досягнута, тоді як для інших мінімальна швидкість ледве досягнута.

Процеси з використанням киплячим шаром широко застосовуються в різних областях хімічної промисловості та технологічних процесах, наприклад:

- змішування твердих матеріалів;
- класифікація та сортування частинок;
- сушка.

Одією із важливих сфер де застосовують процес грануляції з псевдозрідженим шаром є виробництво гранул. Це сприяє передачі тепла і маси в шарі за рахунок перемішування, викликаного потоком рідини.

1.4 Процес грануляції з киплячим шаром

У процесі грануляції з псевдозрідженим шаром речовина в твердому стані у вигляді суспензії або розчину, розпилюється на частинки, що псевдозріджуються потоком газу. Для цього в технологічну камеру встановлюється насадка.

Найпоширенішими конфігураціями є:

- Якщо насадка встановлена над шаром частинок, що знаходяться в стані спокою, вона називається конфігурацією верхнього розпилення;
- Якщо насадка розташована знизу технологічної камери, це називається конфігурацією з нижнім розпиленням.

В кожному із випадків краплі розчину залишають форсунку і осідають на частинки.

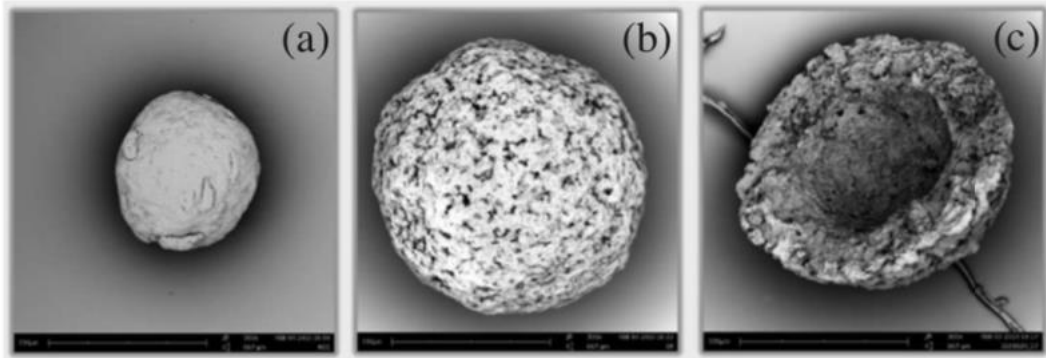


Рисунок 1.6 – Еволюція частинки під час гранулювання розпиленням: (a) початкова частка; (b) кінцева частинка; (c) утворений шар

Завдяки нагріванню потоком газу для псевдозрідження, рідина що міститься в суспензії випаровується, а на частинці утворюється новий шар. На рисунку 1.6 показано частинки, взяті з грануляційного розпилення протягом двох різних часових процесів. Через інтенсивне перемішування частинок у шарі осідання твердої речовини можна вважати рівномірним. Також можна спостерігати нашарування частинки та збільшення її розмірів. Цей механізм зображений на рисунку 1.7.

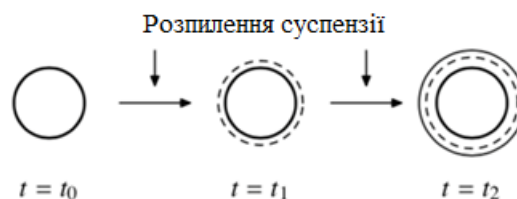


Рисунок 1.7 – Схематичне зображення шаруватого росту частинок методом грануляції розпиленням

Якщо тверда речовина, що розпилюється, ідентична речовині частинки у шарі, то такий процес називається грануляцією розпилення. Він використовується у

харчовій промисловості та у виробництві добрив. Якщо матеріали відрізняються, процес називається покриттям.

Існує ряд ситуацій, які можуть виникнути під час грануляції розпиленням:

- Попереднє висушування крапель: Коли крапелька розчину залишає форсунку, вона майже миттєво контактує з нагрітим газом і рідина що в міститься в ній починає випаровуватись. Якщо відстань до шару дуже велика або висихання дуже швидке, рідина випарується швидше ніж крапелька осідає на частинці в шарі. Після цього крапелька самостійно утворюватиме нову частинку дуже малих розмірів – ядро. Цей ефект називається нуклеацією;
- Якщо в шарі стикаються дві частинки з не повністю висушеними поверхнями, а в'язкість суспензії на поверхні досить висока, утвориться міцний зв'язок між частинками. У найпростішому випадку дві частинки згодом утворюватимуть нову, більшу частинку. Цей ефект називається агломерацією.

1.5 Процес грануляції розпиленням

Грануляція розпиленням, тобто нашарування частинок, зазвичай розглядається у двофазному режимі: тверді частинки диспергуються в газовій фазі. Окрім розшарування частинок також відбувається теплообмін і масообмін над фазовими межами. Для спрощення моделювання даного процесу, рідка фаза розглядається не окремо, а як частина твердої або газової фази.

У загальному випадку частинки в шарі не є однаковими; вони можуть відрізнятися за своїми властивостями, такими як: розмір, температура, вологість, пористість або форма. Також положення в просторі кожної частинки в технологічній камері буде різним. Якщо всі частинки розглядаються як особини популяції частинок і для кожної частинки присвоюються значення її властивостей, які вибираються такими, що продукт можна легко охарактеризувати, то популяція має розподіл по відношенню до обраних властивостей.

2. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

На сьогодні існує досить велика кількість математичних моделей що описують процеси грануляції. Далі в цьому розділі будуть наведені роботи як закордонних науковців так і науковців з України, які займаються вивченням процесу грануло утворення. Для розробки нижче наведених математичних моделей, науковцями були висунуті різноманітні припущення та вимоги щодо цих математичних моделей, тому зупинимось детальніше на кожній з них.

2.1 Модель балансу популяції

Моделі балансу популяції (МБП) широко використовуються для моделювання процесів вологої грануляції, в яких розподіл щільність гранул за розмірами розвивається як функція часу. Популяційний баланс – це числовий баланс навколо кожної розмірної частки розподілу за розміром, заснований на законі збереження чисел.

Швидкість зміни кількості частинок в інтервалі розмірів дорівнює швидкості, з якою гранули входять і виходять з цього інтервалу розмірів в результаті різних явищ, таких як зародження, агрегація і руйнування в системі.

Для добре перемішаного гранулята у грануляторі з псевдозрідженим шаром з верхнім розпиленням передбачається, що агрегація і руйнування є механізмами, які змінюють розподіл часток за розмірами в системі.

Позначимо щільність популяції як $n(L, t)$, виходячи із загальної кількості частинок у псевдозрідженому шарі. Щільність популяції гранул – це функція діаметра частинок L та часу t . Припускаємо просторову гомогенність населення в псевдозрідженому шарі. Величина $n dL$ позначає кількість частинок в межах розмірного класу $[L, L + dL]$.

Рівняння балансу популяції в загальному має вигляд (рівняння 2.1):

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial(Gn)}{\partial L} = B - Dn + O \quad (2.1)$$

де G – швидкість росту частинок;

B – це величина яка відображає утворення нової частинки (гранули);

Dn – це величина яка описує руйнування частинки.

Зростання кількості частинок пов'язане насамперед з розбризкуванням розчину на вже існуючі частинки. Через високу температуру шару передбачається швидке висихання розпилюваного розчину, таким чином, температура, стан насичення і вологість не відображаються в системі рівнянь.

Моделюється загальний об'єм, який додається до існуючих частинок за проміжок часу dt на $(1 - b)\Phi dt$, де $(1 - b)$ – частка в діапазоні від 0 до 1, Φ – ефективний об'ємний потік розпилення. З одного боку, доцільно припустити, що кількість розпорошеного розчину на частинку розміру L за часовий проміжок dt пропорційний його поверхні πL^2 . З іншого боку, збільшення об'єму частинки дорівнює об'єму нанесеного шару на поверхні частинки $\pi L^2(\frac{1}{2}Gdt)$, що також пропорційний L^2 . Тому швидкість росту G не залежить від L .

Загальний обсяг нових шарів на гранулі дорівнює (формула 2.2):

$$\frac{1}{2} G dt \pi \int_0^{\infty} n L^2 dL \quad (2.2)$$

де G – швидкість росту діаметру гранули,

$\frac{1}{2} G$ – швидкість росту радіуса.

Порівнюючи об'єм нових шарів на гранулах з $(1 - b)\Phi$, виходить рівняння швидкості зростання гранул, що є функцією часу (формула 2.3):

$$G = \frac{2(1-b)\Phi}{\pi \int_0^\infty nL^2 dL} \quad (2.3)$$

Деякі краплі розпилюваного розчину повністю висихають, перш ніж потрапити на будь – яку іншу частинку в псевдозрідженому шарі. Ці краплі не сприяють росту гранул, а навпаки, сприяють зародженню нових гранул. Під зародком мається на увазі процес утворення найменших частинок, присутніх у шарі. Позначаємо фракцію розпилення, від якої зароджуються частинки b , тоді отримаємо об'ємний потік зародження часток $b\Phi$. Отже найпростіша модель зародження часток має вигляд (формула 2.4):

$$B = \frac{b\Phi}{\frac{1}{6}\pi L_0^3} \delta(L - L_0) \quad (2.4)$$

Інтеграл об'єму матиме наступний вигляд (формула 2.5):

$$\int_0^\infty \frac{1}{6}\pi L^3 B dL = \Phi dt \quad (2.5)$$

Найпростіший спосіб моделювання руйнування частинок (функція смерті D) – це використання функції Хевісайда до діаметру просіювання L_1 , помножену на постійну величину s – швидкість руйнування гранул (формула 2.6):

$$D = sH(L - L_1) \quad (2.6)$$

Остання величина O прирівнюється до нуля. Завдяки цьому ми ігноруємо виснаження та агрегацію.

Підводячи підсумок, основна модель балансу популяції матиме вигляд (рівняння 2.7 – 2.8):

$$\frac{\partial n}{\partial t} + G \frac{\partial n}{\partial L} = \frac{b\Phi\delta(L - L_0)}{\frac{1}{6}\pi L_0^3} - sH(L - L_1)n, \quad (2.7)$$

$$G = \frac{2(1 - b)\Phi}{\pi \int_0^\infty nL^2 dL} \quad (2.8)$$

Метод балансу популяції корисна для розуміння та контролю широкого кола виробничих проблем.

2.2 Трьохступінчата модель балансу популяції

Багаторівнева трьохступінчата модель балансу популяції (ТСМБП) була розроблена в поєднанні з багатовимірними проєкційними моделями для отримання невідомих констант ядра в моделі балансу популяції (МБП) з урахуванням пакетних і багатоступеневих характеристик псевдозрідженого шару з верхнім розпиленням. Регресія методом дрібних найменших квадратів прийнята в якості методу моделювання масштабу частинок щоб описати взаємозв'язок між керованими робочими змінними і константами ядра, використовуваними в МБП. Модель балансу популяції працює як модель масштабу процесу, що описує еволюцію гранулометричного складу відповідно до констант ядра.

Найбільш широко використовуються рівняння балансу популяції в для процесу грануляції із псевдозрідженим шаром, які можуть бути використані для опису зміни швидкостей функцій щільності, представлених у вигляді (рівняння 2.9 – 2.11):

Перший етап:

$$\frac{\partial n(t,l)}{\partial t} = -\frac{\partial(G(t,L)n(t,l))}{\partial L} + \frac{1}{2} \int_0^l \frac{\beta(t,(l^3-\mu^3)^{1/3},\mu)n(t,(l^3-\mu^3)^{1/3})n(t,\mu)}{(l^3-\mu^3)^{2/3}} d\mu - n(t,l) \int_0^\infty \beta(t,l,\mu)n(t,\mu)d\mu \quad (2.9)$$

Другий етап:

$$\frac{\partial n(t,l)}{\partial t} = \frac{1}{2} \int_0^l \frac{\beta(t,(l^3-\mu^3)^{\frac{1}{3}},\mu)n(t,(l^3-\mu^3)^{\frac{1}{3}})n(t,\mu)}{(l^3-\mu^3)^{\frac{2}{3}}} d\mu - n(t,l) \int_0^\infty \beta(t,l,\mu)n(t,\mu)d\mu \quad (2.10)$$

Третій етап:

$$\frac{\partial n(t,l)}{\partial t} = \frac{1}{2} \int_0^l \frac{\beta(t,(l^3-\mu^3)^{1/3},\mu)n(t,(l^3-\mu^3)^{1/3})n(t,\mu)}{(l^3-\mu^3)^{2/3}} d\mu - n(t,l) \int_0^\infty \beta(t,l,\mu)n(t,\mu)d\mu + \int_l^\infty S(t,\mu)b(l|\mu)n(t,\mu)d\mu - S(t,l)n(t,l) \quad (2.11)$$

де $n(t,l)$ – це функція щільності частинок,

$\beta(t,l,\mu)$ – ядро агрегації, що описує частоту, з якою частинки з діаметром l і μ стикаються, утворюючи частинку об'ємного порядку $l^3 + \mu^3$,

$S(t,l)$ – це константа швидкості руйнування, що описує швидкість, з якою частинки руйнуються,

$b(l|\mu)$ – ядро руйнування, яке описує утворення частинок діаметр l від руйнування частинки діаметром μ .

Рівняння балансу популяції досить складні. Не завжди можливо отримати аналітичні рішення рівнянь, тому, зазвичай їх вирішують чисельними методами. Для вирішення рівнянь використовується трьохетапний дискретний метод (рівняння 2.12 – 2.14). Область розміру гранул ділиться на кілька розмірних бункерів в геометричному ряду, що дає можливість отримати функцію щільності частинок в кожному бункері.

Етап 1:

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{2G_0}{(1+r)L_i} \left(\frac{r}{r^2-1} N_{i-1} + N_i - \frac{r}{r^2-1} N_{i+1} \right) \quad (2.12)$$

Етап 2:

$$\begin{aligned} \frac{dN_i}{dt} = \sum_{j=1}^{i-2} 2^{j-i+1} \beta_{i-1,j} N_{i-1} N_j + \frac{1}{2} \beta_{i-1,j-1} N_{i-1}^2 - N_i \sum_{j=1}^{i-1} 2^{j-i} \beta_{i,j} N_j - \\ - N_i \sum_{j=1}^{n_{max}} \beta_{i,j} N_j \end{aligned} \quad (2.13)$$

Етап 3:

$$\begin{aligned} \frac{dN_i}{dt} = \sum_{j=1}^{i-2} 2^{j-i+1} \beta_{i-1,j} N_{i-1} N_j + \frac{1}{2} \beta_{i-1,i-1} N_{i-1}^2 - N_i \sum_{j=1}^{i-1} 2^{j-i} \beta_{i,j} N_j - \\ - N_i \sum_{j=1}^{n_{max}} \beta_{i,j} N_j - S_i N_i + \sum_{j=1}^{n_{max}} b_{i,j} N_j S_j \end{aligned} \quad (2.14)$$

де N_i – дискретна функція щільності, що означає кількість гранул в діапазоні (L_i, L_{i+1}) ,

G_0 – постійна зростання шару,

n_{max} – загальне число дискретних бункерів,

$\beta_{i,j}$ – ядро агрегації між гранулами в бункерах i – го і j – го розміру,

S_i – швидкість відбору частинок.

2.3 Трьохфазна математична модель

Для створення даної математичної моделі процесу грануляції у псевдозрідженому шарі, даний процес розглянуто як гетерогенний трифазний процес під час якого між собою взаємодіють три фази: частинки – центри гранулювання, вихідна речовина – сульфат амонію у вигляді крапель та теплоносій – повітря.

Для розробки даної математичної моделі було висунуто наступні припущення:

- Частинки монодисперсні, непористі, агломерація відсутня. Інтенсивність перемішування частинок між шарами описується коефіцієнтом осьової дисперсії r , який залежить від швидкості руху газової фази, а також властивостей частинок;
- Краплі, одержувані за допомогою пневматичної форсунки, мають вузький розподіл за розміром, що дозволяє розглядати їх як монодисперсну фазу. Між краплями відсутні зіткнення і злипання, немає налипання на стінках апарату. Краплі рухаються крізь псевдозріджений шар співспрямовані з потоком повітря.

Процес теплообміну в грануляторі описує наступна система рівнянь.

Рівняння 2.15 описує зміну температури частинок у шарі:

$$M_{\text{ч}} C_{\text{ч}} \frac{dT_{\text{ч}}}{dt} = M_{\text{ч}} C_{\text{ч}} r_{\text{ч}} T_{\text{ч}}^0 + R^{\text{адг}} M_{\text{ч}} C_{\text{к}} (T_{\text{к}} - T_{\text{ч}}) + G_{\text{к}} X_{\text{к}} Q_{\text{крст}} - M_{\text{п}} v_{\text{суш}} Q_{\text{вип}} + \alpha_{\text{ч}} S_{\text{ч}} (T_{\text{п}} - T_{\text{ч}}) \quad (2.15)$$

де C – питома теплоємність, Дж/кг·К,

G – масові витрати розчину, кг/с,

T – температура, К,

ч, к, п – індекси, що позначають відношення параметрів до частинок, крапель та повітря відповідно,

$T_{\text{ч}}^0$ – початкова температура частинок, К,

$r_{\text{ч}}$ – коефіцієнт аксіальної дисперсії частинок, с^{-1} ,

$v_{\text{суш}}$ – питома швидкість сушіння вологи в краплях, $\text{кг}/(\text{кг}\cdot\text{с})$,

$x_{\text{к}}$ – концентрація крапель розчину,

$Q_{\text{вип}}$ – питома теплота випаровування вологи, Дж/кг,

$Q_{\text{крст}}$ – питома теплота кристалізації крапель, Дж/кг,

$\alpha_{\text{ч}}$ – коефіцієнт теплопередачі частинок, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$,

$S_{\text{ч}}$ – площа поверхні частинок, м^2 .

Рівняння 2.16 описує зміну температури крапель розчину у шарі:

$$M_{\text{к}}C_{\text{к}}\frac{dT_{\text{к}}}{dt} = G_{\text{к}}C_{\text{к}}T_{\text{к}}^0 - R^{\text{адг}}M_{\text{ч}}C_{\text{к}}(T_{\text{к}} - T_{\text{ч}}) + M_n v_{\text{суш}}Q_{\text{вип}} + \alpha_{\text{к}}S_{\text{к}}(T_n - T_{\text{ч}}) \quad (2.16)$$

де $T_{\text{к}}^0$ – початкова температура крапель, К,

$C_{\text{к}}$ – коефіцієнт теплопередачі крапель, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$,

$S_{\text{к}}$ – площа теплопередачі крапель, м^2 .

Чим більші сили адгезії діють між краплями рідини та твердими частинками, чим більша швидкість адгезії, тим з більшою ймовірністю будуть зростати гранули, тобто збільшуватись кількість шарів розчину на гранулі.

Адгезійні властивості краплі розчину, залежать від жорсткості поверхні гранули та властивостей речовини що розпилюється.

Рівняння 2.17 описує зміну температури повітря яке використовується для нагрівання:

$$M_n C_n \frac{dT_n}{dt} = G_n (C_n^0 T_n^0 - C_n T_n) - \alpha_{\text{ч}} S_{\text{ч}} (T_n - T_{\text{ч}}) - \alpha_{\text{к}} S_{\text{к}} (T_n - T_{\text{к}}) \quad (2.17)$$

де C_n^0 – початкова теплоємність повітря, Дж/(кг·К),

T_n^0 – початкова температура повітря, К.

В розробленій системі рівнянь враховуються емпіричні співвідношення для розрахунку питомої швидкості сушки гранул, питомої швидкості осідання крапель розчину на частинках в результаті адгезії, коефіцієнта аксіальної дисперсії частинок, коефіцієнтів теплопередачі, співвідношень для розрахунку втрат матеріалу і товщини шару покриття, а також початкових умов.

Фінальна система рівнянь 2.18 – 2.20 описує процеси гранулоутворення та зневодення в грануляторі має наступний вигляд.

Рівняння зміни температури частинок:

$$M_{\text{ч}} C_{\text{ч}} \frac{dT_{\text{ч}}}{dt} = M_{\text{ч}} C_{\text{ч}} r_{\text{ч}} T_{\text{ч}}^0 + \frac{G_{\text{к}}}{M_{\text{ч}}^0} \cdot \left(\frac{\frac{b_R}{T_{\text{к}}}}{\frac{b_R}{T_{\text{к}}} + 0,35} \right)^2 \cdot M_{\text{ч}} C_{\text{к}} (T_{\text{к}} - T_{\text{ч}}) + G_{\text{к}} x_{\text{к}} Q_{\text{крист}} - \frac{\beta_{\text{к}}(\xi_1 T_{\text{к}} - \xi_2 T_{n2})}{T} + \alpha_{\text{ч}} S_{\text{ч}} (T_n - T_{\text{ч}}) \quad (2.18)$$

Рівняння зміни температури крапель розчину:

$$M_{\text{к}} C_{\text{к}} \frac{dT_{\text{к}}}{dt} = G_{\text{к}} C_{\text{к}} T_{\text{к}}^0 - \frac{G_{\text{к}}}{M_{\text{ч}}^0} \cdot \left(\frac{\frac{b_R}{T_{\text{к}}}}{\frac{b_R}{T_{\text{к}}} + 0,35} \right)^2 \cdot M_{\text{ч}} C_{\text{к}} (T_{\text{к}} - T_{\text{ч}}) + \frac{\beta_{\text{к}}(\xi_1 T_{\text{к}} - \xi_2 T_{n2})}{T_{\text{ч}}} + \alpha_{\text{к}} S_{\text{к}} (T_n - T_{\text{к}}) \quad (2.19)$$

Рівняння зміни температури повітря:

$$M_n C_n \frac{dT_n}{dt} = G_n (C_n^0 T_n^0 - C_n T_n) - \alpha_{\text{ч}} S_{\text{ч}} (T_n - T_{\text{ч}}) - \alpha_{\text{к}} S_{\text{к}} (T_n - T_{\text{к}}) \quad (2.20)$$

Розроблена математична модель враховує гідродинаміку псевдозрідженого шару, явища стикання крапель з частинками та їх адгезію, а також кінетику сушіння розчину на поверхні частинок.

2.4 Двох компонентна модель балансу популяції

Протягом останніх десятиліть багато дослідницьких робіт з моделювання процесів грануляції ґрунтувалося на одновимірній дискретизованій моделі балансу популяції (МБП) процесу грануляції з псевдозрідженим шаром, при якому передбачається, що псевдозріджений шар є добре змішаною системою, а механізми агрегації та розриву просторово однорідні для еволюції росту гранул. Очевидно, це не відповідатиме дійсності в реальному процесі грануляції з псевдозрідженим шаром.

Добре відомо, що частинки в псевдозрідженому шарі не є однорідно розподіленими та їх гідродинаміка та кінетичні параметри що стосується процесу збільшення розмірів, змінюються залежно від часу та положення в шарі. Таким чином, модель балансу популяції на основі однорідності не може бути застосована для всього процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. У верхньому грануляторі з псевдозрідженим шаром з розбризкуванням розчину, в якому рідкий розчин сполучного речовини розпорошується у верхній частині шару на киплячий шар, були виявлені три області зі значними градієнтами температури та показано, що різні механізми грануляції домінують у кожній із зон:

- Змочувально-активна зона – є областю низької температури та підвищеної вологості. Вона розташована поблизу зони обприскування у верхній частині шару. Високі градієнти вологості та температури зумовлені змочуванням псевдозріджених частинок розпиленням рідким сполучним розчином та випаровуванням вологи;
- Ізотермічна зона – знаходиться біля стінок гранулятора та навколо змочувальної зони. У цій області існує рівновага між теплопереносом та масопереносом, а температура повітря є однорідною;
- Зона передачі тепла – розташована прямо над нижньою сіткою розподілу гарячого повітря. Встановлено, що в процесі грануляції верхнього розрідженого киплячого шару агломерація частинок в основному відбувається в зоні активного змочування через високу вологість, а в ізотермічних зонах і зонах теплопередачі гранули висихають та затвердіють.

Тому важливо розглянути різні механізми грануляції відповідно до різних зон у моделі процесу грануляції для точного прогнозування еволюції росту гранул під час грануляції. Хоча багатокомпонентне моделювання ефективно застосовується для моделювання змішування рідин в реакторах, таких як гранульоване змішування та біореактор, для моделювання процесу грануляції у грануляторі із псевдозрідженим шаром з розбризкуванням, мультикомпонентна модель дасть можливість ефективніше змоделювати процес. Зовсім недавно ідея двокомпонентної моделі була застосована для моделювання процесу грануляції киплячого шару з розбризкуванням з двома добре змішаними зонами змочування та сушіння, в яких модель одномірного балансу популяції застосовується лише до зони розпилення, де моделюється процес агрегації, а гранули зв'язуються між двома зонами при постійній швидкості потоку.

Очевидно, що необхідні додаткові дослідження як фундаментальних, так і прикладних досліджень з багатокомпонентного моделювання процесів грануляції з псевдозрідженим шаром. Запропонована модель спроможна зв'язати основні фактори експлуатації спрею в розчині, швидкості розпилення сполучного розчину, тиску при якому розпилюється гаряче повітря та частоти імпульсів для точного прогнозування поведінки росту гранул у системі. Дана модель ґрунтується на двох просторових відсіках змочувальної та висушувальної зони верхнього гранулятора з киплячим шаром з розбризкуванням, і називається двокомпонентною моделлю балансу популяції (ДКМБП). Передбачається, що кожен з двох відсіків ідеально змішаний і може бути описаний одновимірною моделлю балансу популяції з різними механізмами грануляції для прогнозування загальної поведінки росту гранул у грануляторі, в якому механізм агрегації передбачається у змочувальному відсіку.

Двокомпонентна модель балансу популяції може з точністю прогнозувати еволюцію розміру гранул та розподіл у різних регіонах всередині гранулятора при різних умовах експлуатації розпилювача. Двома критичними проблемами моделювання ДКМБП є розміри відсіків для змочування та сушіння та швидкість обміну частинок між ними. Дослідження показали, що розмір змочувального відсіку може займати від 14% до 30% шару залежно від умов експлуатації. Дана модель

передбачає фіксовані розміри змочувальних і сушильних відсіків, тобто 30% шару складало змочувальне відділення, а 70% шару – сушильне відділення. Швидкість обміну частинок між змочувальними та сушильними відсіками може бути визначена часом перебування частинок у кожному відділенні, яке може характеризуватися властивостями потоку та розподілом частинок у шарі. Схема циркуляції частинок може бути постійною, регулюючи швидкість вхідного повітря. Об'ємні частки частинок у кожному з двох відсіків і обмін між розраховуються на основі результатів CFD, а потім були використовуються в ДКМБП.

Дана математична модель має наступний вигляд (рівняння 2.21 – 2.23):

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_{WC}(t,l)}{\partial t} = & \frac{1}{2} \int_0^l \frac{\beta_{WC}\left(t, (l^3 - \mu^3)^{\frac{1}{3}}, \beta\right) n_{WC}\left(t, (l^3 - \mu^3)^{\frac{1}{3}}\right) n_{WC}(t, \mu)}{(l^3 - \mu^3)^{\frac{2}{3}}} d\mu - \\ & - n_{WC}(t, l) \int_0^\infty \beta_{WC}(t, l, \mu) n_{WC}(t, \mu) d\mu - n_{WC \rightarrow DC}(t, l) + n_{DC \rightarrow WC}(t, l) \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_{WC}(t,l)}{\partial t} = & \int_l^\infty S_{DC}(t, \mu) b_{DC}(l|\mu) n_{DC}(t, \mu) d\mu - S_{DC}(t, l) n_{DC}(t, l) - n_{DC \rightarrow WC}(t, l) + \\ & + n_{WC \rightarrow DC}(t, l) \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$n(t, l) = \alpha \cdot n_{WC}(t, l) + (1 - \alpha) \cdot n_{DC}(t, l) \quad (2.23)$$

де $n(t, l)$ – функція щільності чисельності всього псевдозрідженого шару; $\beta_{WC}(t, l, \mu)$ – це ядро агрегації на основі довжини, що описує частоту, з якою частинки з діаметром l та μ стикаються, утворюючи частинку об'ємом $l^3 + \mu^3$, $S_{DC}(t, l)$ – це постійна швидкість вибору розриву на основі довжини, що описує швидкість, з якою частинки обираються для розриву,

$b_{DC}(l|\mu)$ являють собою руйнацію ядра, що описує утворення частинок діаметром l від розриву частинок діаметром μ .

3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗНЕВОДНЕННЯ ТА ГРАНУЛЮВАННЯ

Основою для проектування контролера є динамічна модель процесу. В принципі, чим точніше опис процесу, тим більше можна сказати про результат процесу. Але надмірна кількість деталей може також різко ускладнити процес проектування контролера, тому в певний момент робляться припущення, які згодом спростять конструкцію контролера, не надто приносячи шкоди точності результату процесу.

3.1 Характеристика математичної моделі

На процес гранулоутворення у грануляторі великий вплив мають такі параметри як: температура гранул, температура повітря, яким псевдозріджується шар та вологовміст гранул. В створеній математичній моделі велика увага приділяється контролю даних параметрів, аби система керування змогла забезпечити ефективно використання ресурсів та високу якість продукції.

Математична модель повинна відповідати наступним вимогам:

- Температурний діапазон в якому працює гранулятор повинен бути в межах від 360 К до 480 К;
- Початкові умови для параметрів вологовмісту гранул, температури гранул, та температури повітря при яких починає працювати гранулятор повинні лежати в межах 90 – 92 %, 358 – 360 К та 470 – 475 К відповідно;
- Граничні умови для параметрів вологовмісту – вологовміст гранул на виході повинен лежати в межах від 15 % до 25 %, температури гранул – температура гранул не повинна перевищувати 360 К – 380 К, температура повітря – не повинна виходити за рамки температурного діапазону.

Вологовміст гранул, температура повітря всередині грануляторі що використовується для процесу гранулоутворення та температура гранул тісно зв'язані

між собою, тому що якщо температура повітря буде перевищувати температурний діапазон, відбудеться надлишкове нагрівання гранул та критичне зниження вологовмісту в гранулі. В результаті чого буде використовуватися надлишкова кількість енергії на нагрівання повітря, що є не ефективним з точки зору енергоефективності, а зменшення кількості вологи у гранулах може призвести до їх хрупкості, що негативно впливає на процес транспортування та використання мінеральних добрив, тому важливо, що розроблена математична модель відповідає встановленим до неї вимогам.

При створенні математичної моделі були висунуті наступні припущення:

- Зміна параметрів псевдозрідженого шару відбувається в часі, без урахування радіальної складової та зміни по висоті;
- Теплообмін між повітрям, частинками та краплями є конвективним;
- Зміна температури та вологовмісту по ширині шару не суттєво впливає на процес утворення гранул, тому нею ми можемо знехтувати;
- Псевдозріджений шар добре перемішаний, відсутній застійні зони.

Процеси зневоднення та грануляції описує розроблена математична модель у вигляді системи з трьох диференціальних рівнянь. Рівняння 3.1 описує зміну температури повітря, яке використовується для нагрівання шару та гранулоутворення:

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T_r}{\partial t} + V_r \cdot \varepsilon \cdot \rho \cdot \frac{\partial T_r}{\partial x} = \varepsilon \cdot a \cdot \frac{\partial^2 T_r}{\partial y^2} - \alpha \cdot F \cdot (T_r - T_{гр}) + G_p \cdot (1 - x_p) \cdot (r + C_n T_{гр}) \quad (3.1)$$

де ρ – густина гранул, кг/м³,

C – теплоємність гранул Дж/(кг · К),

T_r – температура теплоносія, К,

V_r – швидкості теплоносія), м/с,

ε – поруватість потоку гранул, %,

α – коефіцієнт тепловіддачі, 1/с,

a – коефіцієнт горизонтальної теплопровідності, м²/с;

F – площа газорозподільної решітки, м²,

T_{gp} – температура гранул, К,

G_p – витрати вихідного розчину, м³/с,

x_p – концентрація вихідного розчину,

r – теплота пароутворення, Дж/кг,

C_n – питома теплоємність повітря, Дж/(кг · К),

x – висота апарату, м,

y – ширина апарату, м.

Рівняння 3.2 описує зміну температури отриманих в процесі грануляції гранул:

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho \cdot C \cdot \frac{\partial T_{gp}}{\partial t} - V_{gp}(1 - \varepsilon) \cdot \rho \cdot \frac{\partial T_{gp}}{\partial x} = \alpha \cdot F \cdot (T_r - T_{gp}) - G_p(1 - x_p)(r + C_n T_{gp}) + G_p x_p q \quad (3.2)$$

де V_{gp} – швидкість розбризкування розчину, м/с,

q – теплота, що виділяється під час кристалізації розчину, Дж/кг.

Рівняння 3.3 описує вологовміст гранул:

$$\varepsilon \cdot \rho \cdot \frac{\partial W_r}{\partial t} + V_r \cdot \varepsilon \cdot \rho \cdot \frac{\partial W_r}{\partial x} = D \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial^2 W_r}{\partial y^2} + \beta \cdot F \cdot (\zeta_1 T_r - \zeta_2 T_{p+n}) \quad (3.3)$$

де W_r – вологовміст гранул, %,

D – коефіцієнт дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$,

β – коефіцієнт масовіддачі $\text{кг}/\text{м}^2\text{с}$,

ζ_1, ζ_2 – вагові коефіцієнти.

Розроблена математична модель (рівняння 3.1 – 3.3) враховує гідродинаміку псевдозрідженого шару, а також кінетику процесів грануляції та зневоднення.

Для визначення, чи відповідає розроблена математична модель поставленим до неї вимогам, потрібно проаналізувати її адекватність, тобто перевірити, результати розрахунків вищенаведених рівнянь.

Розв'язок математичної моделі аналітичними методами був би довготривалим та трудомістким процесом, тому краще використати чисельні методи для перевірки адекватності розробленої моделі.

3.2 Методи дослідження адекватності математичної моделі

В цьому розділі наведено чисельні методи, що використовуються для розв'язання диференціальних рівнянь, та оберемо оптимальний для нашого випадку метод.

3.2.1 Метод Ейлера

Метод Ейлера використовується для наближення розв'язків певних диференціальних рівнянь і працює шляхом наближення кривої рішення до лінійних відрізків. У деяких випадках неможливо записати рівняння для кривої, але ми все одно можемо знайти приблизні координати для точок по кривій, використовуючи

прості лінії. Ці відрізки лінії мають той же нахил, що і крива, тому вони залишаються відносно близько до неї.

Метод Ейлера є корисним, оскільки диференціальні рівняння часто з'являються у фізиці, хімії та економіці, але зазвичай їх неможливо вирішити, тому для їх розв'язку використовують апроксимацію. Наприклад, метод Ейлера може бути використаний для наближення траєкторії руху об'єкта, що потрапляє у в'язку рідину, швидкості реакції в часі, потоку руху по завантаженій дорозі. Хоча метод Ейлера може здаватися складним, його ідея дуже проста.

Припустимо, у нас є функція $f(x)$, і ми знаємо значення f в точці x_0 , і $f'(x_0)$. Якщо ми хочемо знайти значення f у точці, близькій до x , скажімо, $x + h$, то можемо виконати наближення $f(x + h)$, використовуючи дотичну лінію до графіка в точці $(x_0, f(x_0))$, як показано на рисунку 3.1. Ідея полягає в тому, що $f'(x_0)$ оцінює, скільки змін відбувається в y за кожну зміну x . Ми знаємо, що x збільшився на h , тому y повинно було збільшитися приблизно на $hf'(x_0)$, тому нове значення повинно бути $f(x_0) + hf'(x_0)$.

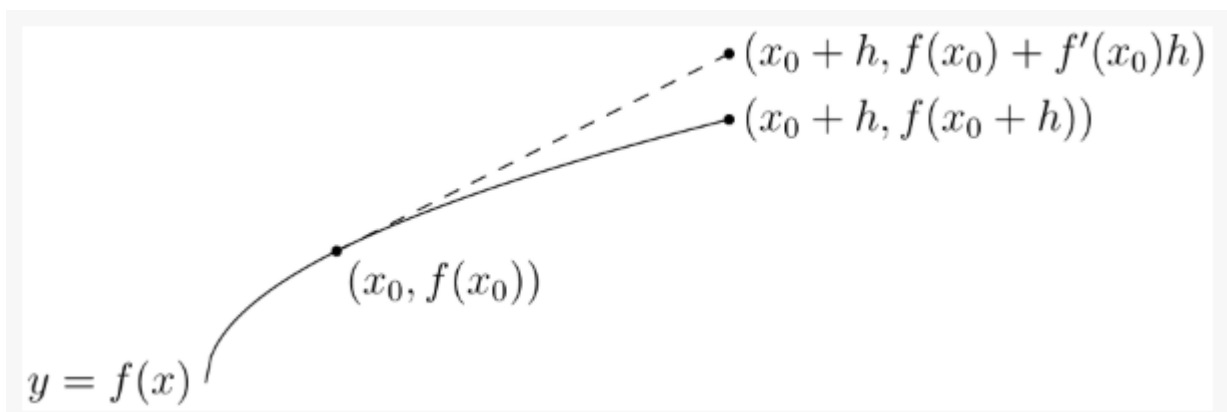


Рисунок 3.1 – Зображення дотичної

Звичайно, коли h стає більше, наше наближення стає все менш точним. Ідея методу Ейлера полягає в тому, щоб виправити це шляхом багаторазового використання наближених дотичних ліній; так, наприклад, наблизити $f(x+3h)$,

спочатку наблизивши $f(x + h)$, потім $f(x + 2h)$, і тоді $f(x + 3h)$. На кожному кроці ми використовуємо нахил кривої для побудови наступного відрізка лінії, і це дозволяє нам "слідувати" за кривою за допомогою сегментів лінії, як показано на рисунку 3.2. Число h називається розміром кроку і вимірює, наскільки малі приблизні сегменти.

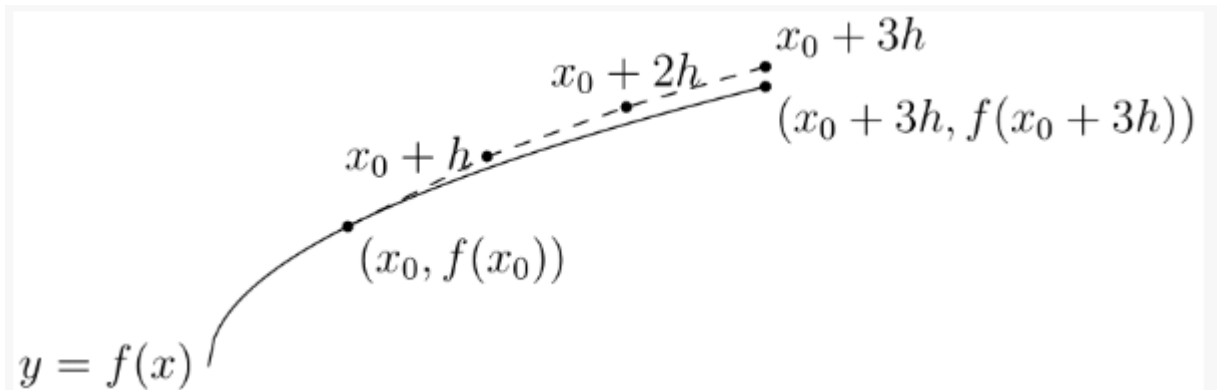


Рисунок 3.2 – Слідування за кривою за допомогою сегментів

Для диференціального рівняння виду $y' = f(x)$ де $y(x_0) = y_0$, послідовність точок x_n, y_n , що задовольняє $x_{n+1} = x_n + h$ і $y_{n+1} = y_n + hf(x_n)$, де h – розмір кроку, можна використовувати наближення $y(x)$ для деякого x . Ідея полягає в тому, щоб вибрати h , розмір кроку, щоб один з x_n був у – значенням, яке оцінюється.

Цей метод також може бути використаний для диференціальних рівнянь першого порядку, які є рівняннями форми $\frac{dy}{dx} = f(x, y)$. У цьому випадку нахил дотичної лінії є виразом, що включає як x так і y , тому ми використовуємо повторення $x_{n+1} = x_n + h$ і $y_{n+1} = y_n + hf(x_n, y_n)$, але ідея по суті однакова.

3.2.2 Метод Рунге –Кутти

Формула методу Ейлера має вигляд, показаний на формулі 3.4:

$$y_{n+1} = y_n + hf(x_n, y_n) \quad (3.4)$$

що розраховує рішення від x_n до $x_{n+1} = x_n + h$. Формула є несиметричною: вона розраховує рішення через інтервал h , але використовує інформацію про похідну тільки на початку цього інтервалу. Це означає та це можна перевірити за допомогою розширення по статичним рядам, що помилка кроку всього на одну ступінь h менше, ніж поправка.

Є кілька причин, за якими метод Ейлера не рекомендується для практичного використання, серед них:

- Метод не дуже точний в порівнянні з іншими, які працюють з еквівалентним розміром кроку,
- Метод не дуже стабільний

Однак, розглянемо використання кроку, який подібний кроку, що використовується у формулі 3.4, щоб зробити «пробний» крок до середини інтервалу. Потім використаємо значення x і y в цій середній точці, щоб обчислити «реальний» крок по всьому інтервалу.

Як зазначено в визначені помилки, ця симетризація скасовує член помилки першого порядку, роблячи метод другого порядку. Фактично, формули 3.5 – 3.7 називаються методом Рунге – Кутта другого порядку або методом середньої точки.

$$k_1 = hf(x_n, y_n) \quad (3.5)$$

$$k_2 = hf\left(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}k_1\right) \quad (3.6)$$

$$y_{n+1} = y_n + k_2 + O(h^3) \quad (3.7)$$

Є багато способів оцінити праву частину $f(x, y)$, які узгоджуються з першим порядком, але мають різні коефіцієнти членів помилки вищого порядку. Додавши правильну комбінацію з них, ми можемо усунути помилки, порядок за порядком. Це основна ідея методу Рунге – Кутта.

Безумовно, найбільш часто використовуваною є класична формула Рунге – Кутта четвертого порядку (рівняння 3.8 – 3.12):

$$k_1 = hf(x_n, y_n) \quad (3.8)$$

$$k_2 = hf\left(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}k_1\right) \quad (3.9)$$

$$k_3 = hf\left(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}k_2\right) \quad (3.10)$$

$$k_4 = hf(x_n + h, y_n + k_3) \quad (3.11)$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{k_1}{6} + \frac{k_2}{3} + \frac{k_3}{3} + \frac{k_4}{6} + O(h^5) \quad (3.12)$$

Метод Рунге – Кутта четвертого порядку вимагає чотирьох оцінок правої частини на кроці h зображених на рисунку 3.3. Це буде краще, ніж метод середньої точки, якщо крок буде щонайменше вдвічі більшим для досягнення такої ж точності.

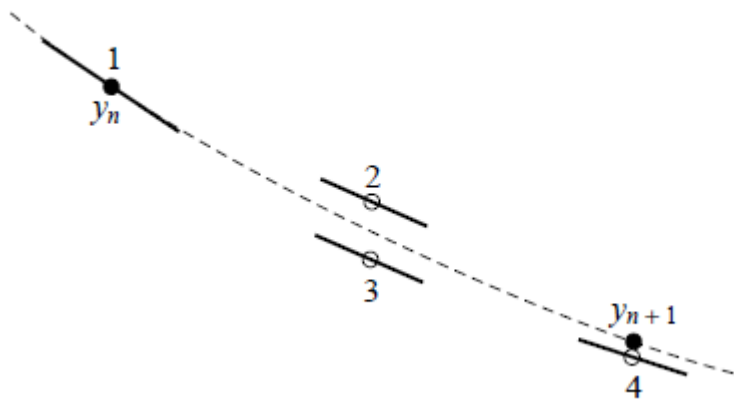


Рисунок 3.3 – Чотири оцінки правої частини рівняння на кожному кроці

На кожному етапі похідна оцінюється чотири рази: один раз у початковій точці, двічі у пробних серединах та один раз у кінцевій точці. З цих похідних обчислюється кінцеве значення функції

Для багатьох наукових користувачів Рунге – Кутти четвертого порядку – це не тільки перше слово коли йдеться про використання ODE інтеграторів, а й останнє. Насправді, можна досить далеко просунути в роботі з цим методом, особливо якщо обладнати його з адаптивним алгоритмом покрокового зміни розміру.

Метод Рунге – Кутта обробляє кожен крок з послідовності кроків однаковою чином. Попереднє рішення не використовується при його поширенні. Це математично правильно, оскільки будь – яка точка на траєкторії звичайного диференціального рівняння може служити вихідною точкою. Той факт, що всі кроки обробляються однаково, також дозволяє легко включити метод Рунге – Кутти у відносно прості схеми управління

3.2.3 Метод Монте – Карло

Метод Монте – Карло (МК) – це чисельний метод моделювання для вирішення задач за допомогою стохастичного відбору проб. Цей метод зазвичай застосовується для аналізу фізичних систем, де експеримент утруднений або де рівняння балансу

населення неможливо вирішити. В якості альтернативи для вирішення рівняння що моделюють процес гранулоутворення підхід Монте – Карло може бути застосований до системи часток.

Зазвичай можна виділити дві загальні категорії методів Монте – Карло: метод керування МК, керований часом та метод МК, керований подіями. Велика різниця між двома типами методу МК полягає в тому, чи обраний крок часу до події. У колишньому підході спочатку визначається часовий інтервал, і метод Монте – Карло використовується для вирішення, які або скільки подій будуть реалізовані протягом кроку часу. Навпаки, у керованому подіями методі МК час між подіями обчислюється на основі відомої ймовірності події.

Метод Монте – Карло не потребує явної дискретизації часу і має перевагу в тому, що крок часу може підлаштовуватися під швидкість процесу.

Методи Монте – Карло можна також класифікувати за тим, чи є загальний об'єм чи кількість частинок постійним при моделюванні: метод МК з постійним об'ємом та метод МК з постійною кількістю. У методі МК з постійним обсягом, коли використовується достатня кількість частинок моделювання, цей метод перевіряється, щоб він міг добре мінімізувати статистичні помилки.

Однак якщо обсяг моделювання буде підтримуватися постійною величиною, то в процесі моделювання загальна кількість частинок буде збільшуватися або зменшуватися, що впливає на точність методу МК та час обчислення.

Метод постійного числа МК, при якому кількість частинок підтримується постійною величиною, розширює або стискає фізичний об'єм, представлений симуляцією, щоб постійно підтримувати об'єм реакції, що містить постійну кількість частинок.

Якщо порівняти дискретний метод та метод МК можна цілком вирішити наступні проблеми: відсутність інформації про історію кожної частинки, коли багатовимірні системи мають бути вирішені, секційне представлення призводить до дуже складного алгоритму. Ще однією очевидною перевагою є те, що дискретизація

непотрібна, оскільки вибіркова сукупність явно моделюється. Однак, якщо потрібна висока точність, тривалість процесу моделювання має бути збільшена, що також може призвести до високих витрат на обчислення.

3.3 Дослідження адекватності математичної моделі

Для дослідження адекватності обрано метод Рунге – Кутти з четвертим порядком точності тому що даний метод досить компактний в розрахунках, має високий порядок точності та його легко реалізувати за допомогою будь – якої мови програмування.

Для розрахунку даної моделі приведемо рівняння 3.1 – 3.3 математичної моделі до виду, від якого зручно буде переходити до методу Рунге – Кутти.

У рівнянні 3.1 спочатку замінімо коефіцієнти для зручності:

$$T_r = T_1; T_{гр} = T_2; V_r = V_1; V_{гр} = V_2; W_r = W_1$$

Перенесемо коефіцієнти що не мають похідної по часу в одну сторону, розкриємо дужки та згрупуємо їх (рівняння 3.13):

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = -\frac{V_1}{c} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial x} - \frac{\alpha \cdot F}{\varepsilon \cdot \rho \cdot c} \cdot T_1 + \frac{(\alpha \cdot F + G_p \cdot (1 - x_p) \cdot C_n)}{\varepsilon \cdot \rho \cdot c} \cdot T_2 + \frac{G_p \cdot (1 - x_p) \cdot r}{\varepsilon \cdot \rho \cdot c} + \frac{a}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \quad (3.13)$$

Дане рівняння досить громіздке, тому вільні члени рівняння та коефіцієнти при T_1 та T_2 винесемо окремо та замінімо однією змінною (формули 3.14 – 3.17):

$$a_1 = -\frac{V_1}{c} \quad (3.14)$$

$$a_2 = -\frac{\alpha \cdot F}{\varepsilon \cdot \rho \cdot C} \quad (3.15)$$

$$a_3 = \frac{(\alpha \cdot F + G_p \cdot (1 - x_p) \cdot C_n)}{\varepsilon \cdot \rho \cdot C} \quad (3.16)$$

$$a_4 = \frac{G_p \cdot (1 - x_p) \cdot r}{\varepsilon \cdot \rho \cdot C} + \frac{a}{\rho \cdot C} \cdot \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \quad (3.17)$$

Для спрощення розрахунків коефіцієнта a_4 можемо знехтувати $\frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2}$ так як по ширині шару температура змінюється не суттєво, що було наведено в припущеннях, які формувалися для розробки даної системи, тому a_4 має наступний вигляд (формула 3.18):

$$a_4 = \frac{G_p \cdot (1 - x_p) \cdot r}{\varepsilon \cdot \rho \cdot C} + \frac{a}{\rho \cdot C} \quad (3.18)$$

Після виконаних операції над рівнянням температури повітря, воно має вигляд (рівняння 3.19), від якого можна легко перейти до методу Рунге – Кутта:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial x} + a_2 \cdot T_1 + a_3 \cdot T_2 + a_4 \quad (3.19)$$

Розкладемо $\frac{\partial T_1}{\partial x}$ складові та згрупуємо спільні коефіцієнти (рівняння 3.20 – 3.21):

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{a_1}{\Delta x} \cdot T_1^{j+1} - \frac{a_1}{\Delta x} \cdot T_1^j + a_2 \cdot T_1^j + a_3 \cdot T_2 + a_4 \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_5 \cdot T_1^{j+1} + a_{11} \cdot T_1^j + a_3 \cdot T_2 + a_4 \quad (3.21)$$

Коефіцієнти a_5 та a_{11} мають вигляд (формули 3.22 – 3.23):

$$a_5 = \frac{a_1}{\Delta x} \quad (3.22)$$

$$a_{11} = a_2 - a_5 \quad (3.33)$$

В результаті маємо чотири стадії обрахунку значення температури повітря (рівняння 3.34 – 3.37) по методу Рунге – Кутта ($K_{1..4}$):

$$K_1 = h \cdot (a_5 \cdot T_1^{j+1} + a_{11} \cdot T_1^j + a_3 \cdot T_2 + a_4) \quad (3.34)$$

$$K_2 = h \cdot \left(a_{11} \cdot \left(T_1^j + \frac{1}{2} K_1 \right) + a_5 \cdot T_1^{j+1} + a_3 \cdot T_2 + a_4 \right) \quad (3.35)$$

$$K_3 = h \cdot \left(a_{11} \cdot \left(T_1^j + \frac{1}{2} K_2 \right) + a_5 \cdot T_1^{j+1} + a_3 \cdot T_2 + a_4 \right) \quad (3.36)$$

$$K_4 = h \cdot (a_{11} \cdot (T_1^j + K_3) + a_5 \cdot T_1^{j+1} + a_3 \cdot T_2 + a_4) \quad (3.37)$$

Розраховане наближене значення температури повітря (рівняння 3.38):

$$T_1^j = T_1^j + \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \quad (3.38)$$

Для рівнянь температури гранул (рівняння 3.2) та вологовмісту (рівняння 3.3) виконано аналогічні спрощення та заміни коефіцієнтів.

Рівняння температури гранул після групування коефіцієнтів (рівняння 3.39):

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{V_2}{C} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} + \frac{\alpha \cdot F}{(1-\varepsilon) \cdot \rho \cdot C} \cdot T_1 + \frac{(-\alpha \cdot F - G_p(1-x_p)C_n)}{(1-\varepsilon) \cdot \rho \cdot C} T_2 - \frac{G_p(1-x_p)r}{(1-\varepsilon) \cdot \rho \cdot C} + \frac{G_p x_p q}{(1-\varepsilon) \cdot \rho \cdot C} \quad (3.39)$$

Замінімо вільні члени рівняння та коефіцієнти при T_1 та T_2 однією змінною (формули 3.40 – 3.43):

$$a_6 = \frac{V_2}{C} \quad (3.40)$$

$$a_7 = \frac{(-\alpha \cdot F - G_p(1-x_p)C_n)}{(1-\varepsilon) \cdot \rho \cdot C} \quad (3.41)$$

$$a_8 = \frac{\alpha \cdot F}{(1-\varepsilon) \cdot \rho \cdot C} \quad (3.42)$$

$$a_9 = -\frac{G_p(1-x_p)r}{(1-\varepsilon) \cdot \rho \cdot C} + \frac{G_p x_p q}{(1-\varepsilon) \cdot \rho \cdot C} \quad (3.43)$$

Після виконаних замінь, рівняння, що описує температуру гранул матиме наступний вигляд (рівняння 3.44):

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_6 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} + a_7 \cdot T_2 + a_8 \cdot T_1 + a_9 \quad (3.44)$$

Розкладемо похідну $\frac{\partial T_2}{\partial x}$ на складові та згрупуємо спільні коефіцієнти (рівняння 3.45 – 3.46):

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{a_6}{\Delta x} \cdot T_2^{j+1} - \frac{a_6}{\Delta x} \cdot T_2^j + a_7 \cdot T_2^j + a_8 \cdot T_1 + a_9 \quad (3.45)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_{10} \cdot T_2^{j+1} - a_{10} \cdot T_2^j + a_7 \cdot T_2^j + a_8 \cdot T_1 + a_9 \quad (3.46)$$

В результаті маємо чотири стадії обрахунку значення температури гранул (рівняння 3.47 – 3.50) по методу Рунге – Кутта ($K_{1..4}$):

$$K_1 = h \cdot (a_{12} \cdot T_2^{j+1} + a_{10} \cdot T_2^j + a_8 \cdot T_1 + a_9) \quad (3.47)$$

$$K_2 = h \cdot \left(a_{12} \cdot \left(T_2^j + \frac{1}{2} K_1 \right) + a_{10} \cdot T_2^{j+1} + a_8 \cdot T_1 + a_9 \right) \quad (3.48)$$

$$K_3 = h \cdot \left(a_{12} \cdot \left(T_2^j + \frac{1}{2} K_2 \right) + a_{10} \cdot T_2^{j+1} + a_8 \cdot T_1 + a_9 \right) \quad (3.49)$$

$$K_4 = h \cdot (a_{12} \cdot (T_2^j + K_3) + a_{10} \cdot T_2^{j+1} + a_8 \cdot T_1 + a_9) \quad (3.50)$$

Та розраховане наближене значення температури гранул (рівняння 3.51):

$$T_2^j = T_2^j + \frac{1}{6} (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \quad (3.51)$$

У рівнянні залежності вологовмісту (рівняння 3.3) від часу згрупуємо коефіцієнти та розкриємо дужки (рівняння 3.52):

$$\frac{\partial W_1}{\partial t} = -V_1 \cdot \frac{\partial W_1}{\partial x} + \frac{D}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 W_1}{\partial y^2} + \frac{\beta \cdot F \cdot \zeta_1}{\varepsilon \cdot \rho} T_1 - \frac{\beta \cdot F \cdot \zeta_2}{\varepsilon \cdot \rho} T_2 \quad (3.52)$$

Для зручності розрахунків замінимо громіздкі коефіцієнти (формули 3.54 – 3.57):

$$a_{13} = -V_1 \quad (3.54)$$

$$a_{14} = \frac{\beta \cdot F \cdot \zeta_1}{\varepsilon \cdot \rho} \quad (3.55)$$

$$a_{15} = -\frac{\beta \cdot F \cdot \zeta_2}{\varepsilon \cdot \rho} \quad (3.56)$$

$$a_{16} = \frac{D}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 W_1}{\partial y^2} \quad (3.57)$$

Після виконаних замінь, рівняння залежності вологості від часу матиме вигляд (рівняння 3.59):

$$\frac{\partial W_1}{\partial t} = a_{13} \cdot \frac{\partial W_1}{\partial x} + a_{14}T_1 + a_{15}T_2 + a_{16} \quad (3.59)$$

Розкладемо похідну $\frac{\partial W_1}{\partial x}$ на складові (рівняння 3.60):

$$\frac{\partial W_1}{\partial t} = a_{17} \cdot W_1^{j+1} - a_{17} \cdot W_1^j + a_{14}T_1 + a_{15}T_2 + a_{16} \quad (3.60)$$

В результаті виконаних дій маємо 4 стадії для обрахунку значення вологовмісту (рівняння 3.60 – 3.63):

$$K_1 = h \cdot (a_{17} \cdot W_1^{j+1} - a_{17} \cdot W_1^j + a_{14}T_1 + a_{15}T_2 + a_{16}) \quad (3.60)$$

$$K_2 = h \cdot \left(-a_{17} \cdot \left(W_1^j + \frac{1}{2}K_1 \right) + a_{17} \cdot W_1^{j+1} + a_{14}T_1 + a_{15}T_2 + a_{16} \right) \quad (3.61)$$

$$K_3 = h \cdot \left(-a_{17} \cdot \left(W_1^j + \frac{1}{2}K_2 \right) + a_{17} \cdot W_1^{j+1} + a_{14}T_1 + a_{15}T_2 + a_{16} \right) \quad (3.62)$$

$$K_4 = h \cdot \left(-a_{17} \cdot \left(W_1^j + K_3 \right) + a_{17} \cdot W_1^{j+1} + a_{14}T_1 + a_{15}T_2 + a_{16} \right) \quad (3.63)$$

Та розраховане наближене значення вологовмісту (рівняння 3.64):

$$W_1^j = W_1^j + \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \quad (3.64)$$

3.4 Результати дослідження

Для отримання результатів роботи розробленої математичної моделі системи в рамках магістерської роботи було реалізовано програму, яка обраховує та виводить графіки температури повітря, температури гранул та вологовмісту на мову програмування Python в середовищі PyCharm. Для додавання результатів в таблицю та побудову графіків використовувалася бібліотека `xlswriter`. Після виконання програми, дана бібліотека формує файл з результатами та графіками формату `.xlsx`, який можна відкрити за допомогою Microsoft Excel. Лістинг програми та розгорнуті графіки представлено в **додатках**.

Моделювання процесу грануляції та зневоднення відбувалося на основі реальних даних наведених в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні параметри процесу грануляції

| Назва параметра | Умовні позначення | Значення | Розмірність |
|---|-------------------|----------|---------------------|
| Коефіцієнт тепловіддачі | a | 5,56 | Вт/м ² К |
| Витрати розчину | Gp | 0,0068 | кг/с |
| Теплоємність повітря | Cp | 1970 | Дж/кг·К |
| Концентрація розчину | Xp | 0,4 | % |
| Питома теплота пароутворення | r | 129000 | Дж/кг |
| Витрати повітря | G2 | 0,0031 | м ³ /с |
| Теплота, що виділяється під час кристалізації розчину | q | 82300 | Дж/кг |
| Коефіцієнт теплоємності розчину | C | 3897 | Дж/кг·К |

Продовження таблиці 3.1

| | | | |
|----------------------------------|----------------|---------------------|---------------------|
| Молекулярна маса сульфата амонія | MH | 18000 | кг/моль |
| Поверхня масообміну | Fm | 10 | м ² |
| Універсальна газова стала | Rg | 281 | Дж |
| Поруватість потоку гранул | e | 0,4 | % |
| Густина гранул | ρ ₀ | 1450 | кг/м ³ |
| Швидкість розчину | V2 | $2,3 \cdot 10^{-4}$ | м/с |
| Швидкість повітря | V1 | $2,4 \cdot 10^{-5}$ | м/с |
| Коефіцієнт тепловіддачі | aL | 800 | Вт/м ² К |
| Площа газорозподільної решітки | F | 16 | м ² |
| Коефіцієнт масообміну | b | 0,054 | кг/м ² с |
| Коефіцієнт дифузії | D | 0,000245 | м ² /с |
| Початкова температура повітря | T1 | 473 | К |
| Початкова температура гранул | T2 | 360 | К |
| Початковий вологовміст гранул | W1 | 90 | % |

Дослідження адекватності розробленої математичної моделі проведено з кроком інтегрування 0,01 та з кількістю ітерації від 60 000 до 100 000. Результати дослідження та висновки представлені нижче.

Графік зміни температури повітря в грануляторі при 60 000 ітераціях представлено на рисунку 3.4.

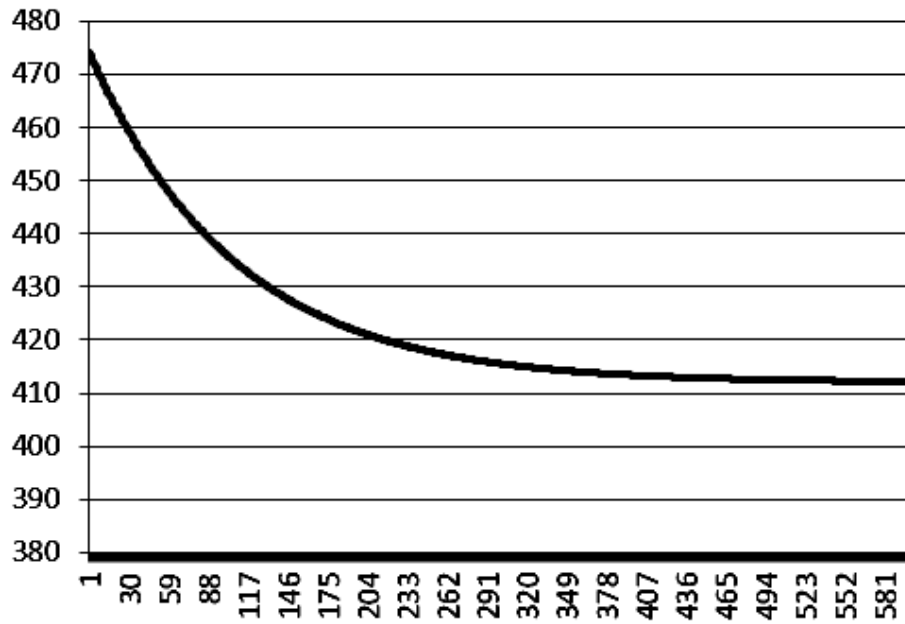


Рисунок 3.4 – Зміна температури повітря при 60 000 ітераціях

Графік зміни температури гранул представлено рисунку 3.5.

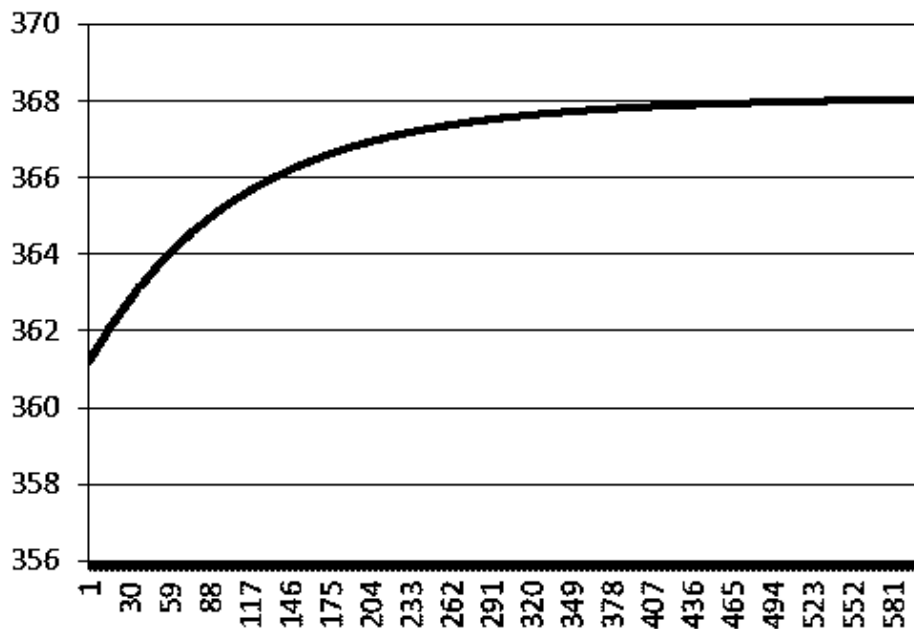


Рисунок 3.5 – Зміна температури гранул при 60 000 ітераціях

Графік зміни вологості гранул представлено на рисунку 3.6.

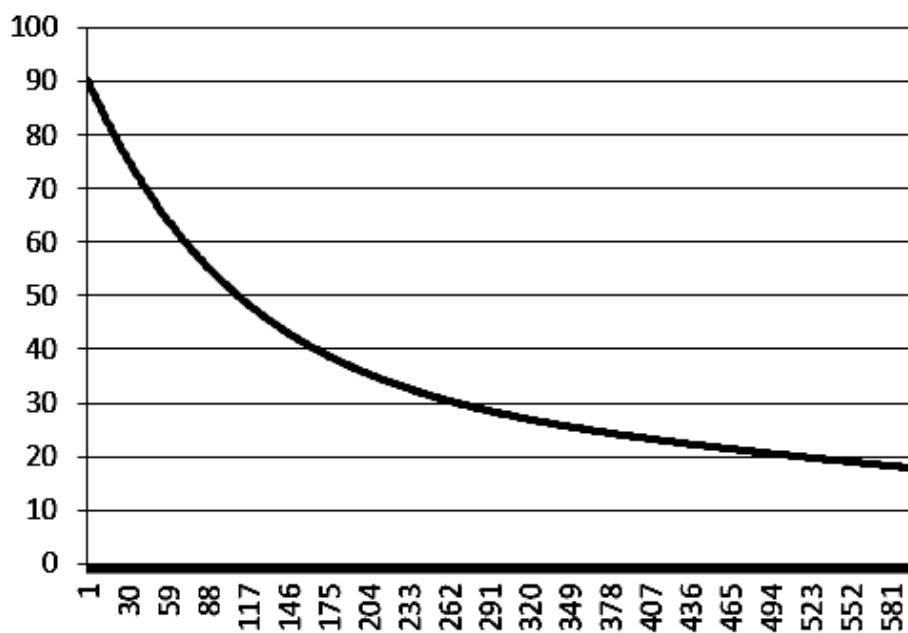


Рисунок 3.6 – Зміна вологовмісту гранул при 60 000 ітераціях

Як можна побачити з наведених вище графіків, температура повітря у грануляторі із початкового значення 473 К в процесі роботи гранулятора спадає до значення 415 К – 410 К. Так як для процесу утворення гранул та їх подальшого висушування потрібна велика кількість тепла, ми спостерігаємо спад температури повітря. В процесі сушки температура гранул повинна зростати, а кількість вологи повинна зменшуватись, що ми можемо спостерігати із графіків представлених на рисунку 3.5 та рисунку 3.6. Результати роботи математичної моделі отримано при 60 000 ітераціях, що еквівалентно в середньому 600 секундам роботи гранулятора.

Змодельюємо роботу математичної моделі при 100 000 ітераціях.

Графік зміни температури повітря в грануляторі представлено на рисунку 3.7.

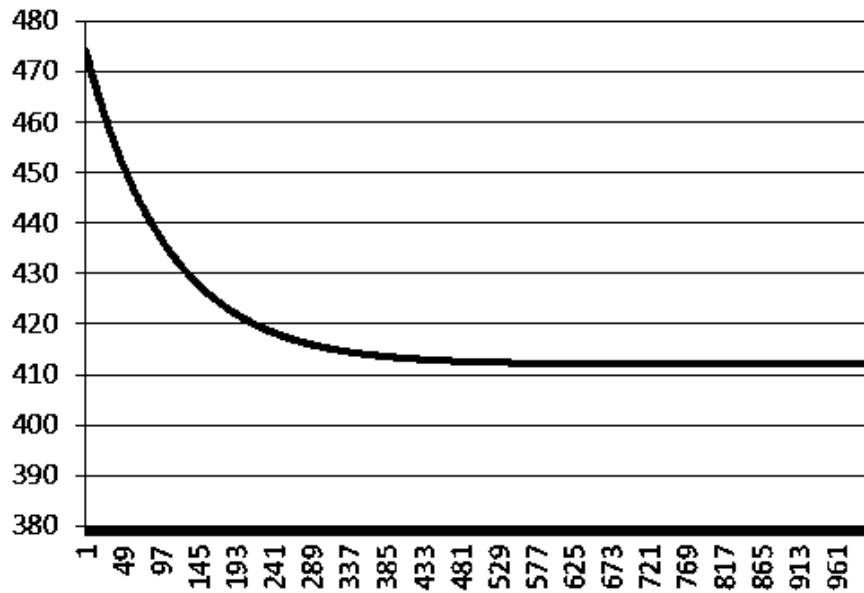


Рисунок 3.7 – Зміна температури повітря при 100 000 ітераціях

Графік зміни температури гранул представлено рисунку 3.8.

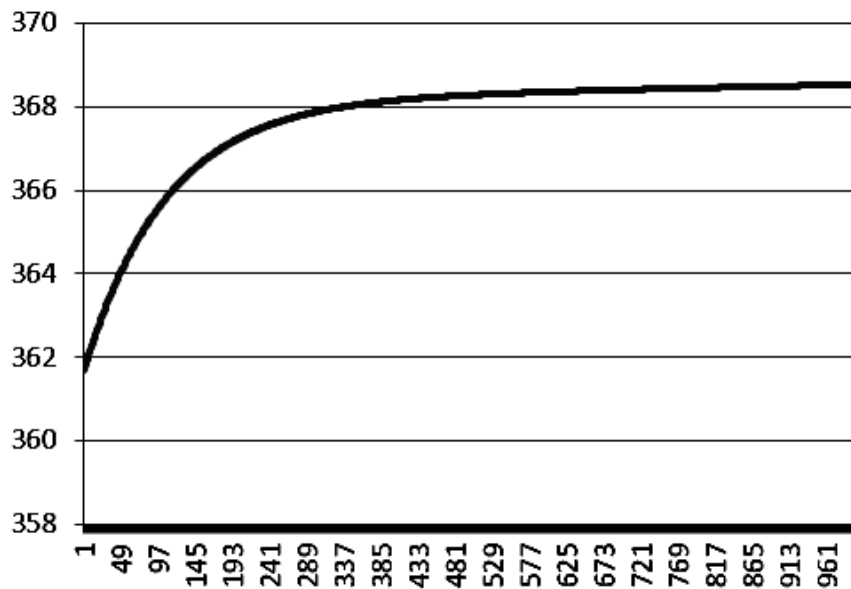


Рисунок 3.8 – Зміна температури повітря при 100 000 ітераціях

Графік зміни вологості представлено на рисунку 3.9.

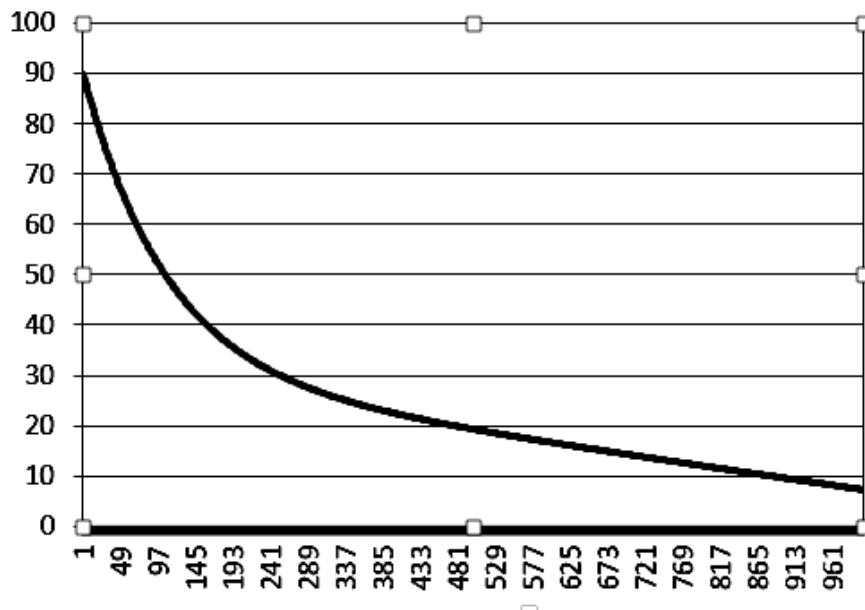


Рисунок 3.9 – Зміна температури повітря при 100 000 ітераціях

Як можемо побачити з отриманих графіків, характер поведінки температури повітря у грануляторі залишається незмінним, тобто він залишається в діапазоні 410 К – 415 К, але чим довше триває процес, тим більше будуть нагріватись гранули, тим більше буде випаровуватись з них вологи відповідно і витрати енергії для виконання даного процесу будуть більші. На рисунку 3.8 можна побачити, що температура гранул починає зростати, відповідно вологовміст гранул падає нижче 10% (рисунок 3.9). Як було описано раніше в цьому розділі, вологовміст гранул повинен бути в межах від 15% до 25 %, тому що чим сухіші гранули тим вони крихкіші. Тому виконувати процес грануляції і зневоднення на протязі 1000 с не є ефективним з точки зору витрат енергії та якості виробленого продукту.

Отже порівнюючи отримані результати, можна сказати, що розроблена математична модель процесу грануляції поводить себе адекватно та відповідає поставленим перед нею вимогам.

4 СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ГРАНУЛЯЦІЇ

Система управління – це система пристроїв або набір пристроїв, яка управляє, або регулює поведінку інших пристроїв або систем для досягнення бажаних результатів. Іншими словами, визначення системи управління може бути спрощено як система, яка управляє іншими системами. У міру того, як людська цивілізація з кожним днем модернізується, попит на автоматизацію відповідно збільшується. Автоматизація вимагає управління пристроями.

Основна особливість систем управління полягає в тому, що повинна бути чітка математична залежність між входом і виходом системи. Коли співвідношення між входом і виходом системи може бути представлене лінійною залежністю, система називається лінійною системою управління. Знову ж, коли взаємозв'язок між входом і виходом не може бути представлений однією лінійною залежністю, а вхід і вихід пов'язані деяким нелінійним відношенням, система називається нелінійною системою управління.

Для будь – якої системи управління існують вимоги, яким вона повинна відповідати:

- Точність: Точність – це похибка вимірювання приладу, яка визначає межі помилок, допущених при використанні приладу в нормальних умовах експлуатації. Точність може бути поліпшена за допомогою елементів зворотного зв'язку;
- Чутливість: параметри системи управління завжди змінюються в залежності від умов навколишнього середовища, внутрішніх перешкод або будь – яких інших параметрів. Ці зміни можуть бути вираженими з точки зору чутливості системи. Будь – яка система управління повинна бути нечутливою до таких параметрів, а чутливою тільки до вхідних сигналів;
- Стабільність: це важлива характеристика системи управління. Для обмеженого вхідного сигналу вихідний сигнал повинен бути також обмежений, і якщо вхід

дорівнює нулю, то вихід повинен бути рівний нулю також, тоді така система управління називається стабільною;

- Коливання: невелика кількість коливань або постійних коливань на виході, як правило, вказують на стабільність системи.

Існує два основних типи систем управління:

- Система управління з відкритим контуром;
- Система управління із замкнутим контуром.

Система управління, в якій керуючий вплив повністю не залежить від виходу системи, називається системою управління з відкритим контуром. Система ручного управління також є системою управління без зворотного зв'язку. На рисунку 4.1 нижче показана блок – схема системи управління з відкритим контуром, в якій вихід процесу повністю незалежний від дії контролера.



Рисунок 4.1 – Схема системи управління з відкритим контуром

Переваги системи управління з розімкненим контуром:

- Проста конструкція;
- Економічний;
- Простота в обслуговуванні.

Недоліки системи управління з розімкненим контуром:

- Низька точність;

- Низька надійність;
- Будь – яка зміна на виході не може бути виправлена автоматично.

Система управління, в якій вихід впливає на величину на вході таким чином, що вхідна величина буде регулюватися самостійно на основі згенерованого виходу, називається системою управління зі зворотним зв'язком. Система управління зі зворотним зв'язком може бути перетворена в систему управління зі зворотним зв'язком, забезпечуючи зворотний зв'язок. Зворотний зв'язок автоматично вносить відповідні зміни у вихідний сигнал. Таким чином, система управління зі зворотним зв'язком називається системою автоматичного управління. На рисунку 4.2 нижче показана схема замкнутої системи управління, в якій зворотний зв'язок береться з виходу і подається на вхід.

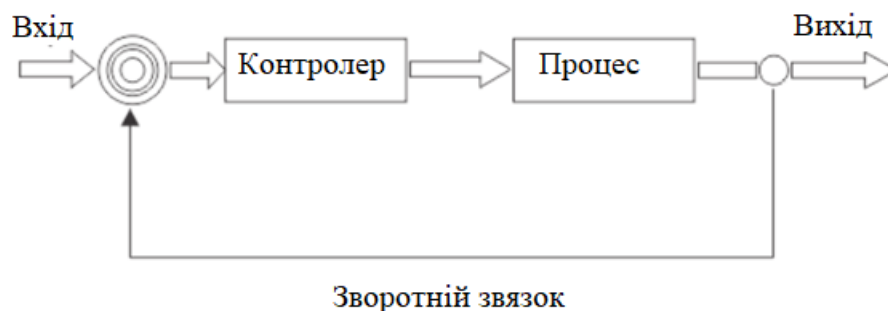


Рисунок 4.2 – Схема систему управління з зворотнім зв'язком

Переваги замкнутої системи управління:

- Системи управління зі зворотним зв'язком більш точні навіть при наявності нелінійності;
- Висока точність, оскільки будь – яка помилка, що виникає може бути виправлена завдяки наявності зворотного зв'язку;
- Широкий діапазон пропускнуої здатності;
- Для підвищення стабільності системи можна зменшити її чутливість.

Недоліки замкнутої системи управління:

- Складні в проектуванні;
- Необхідність в постійному обслуговуванні;
- Зворотній зв'язок призводить до коливального впливу.

Система управління виробництвом гранул в більшій мірі залежить від контролю та управління температурним режимом всередині гранулятора, а саме від температури гранул та температури повітря. Тому необхідно розробити систему управління яка буде за короткий час виводити температуру гранул на заданий рівень на підтримувати її на протязі всього процесу грануляції, для забезпечення високої якості продукту з низьким вологовмістом. Для реалізації такої системи управління найбільше піходить система управління зі зворотнім зв'язком та регулятором.

4.1 Передавальна функція об'єкта управління

Перед початком розробки системи управління, спочатку необхідно визначитись із величинами, за якими буде здійснюватися контроль та регулювання, та на їх основі побудувати передаточну функцію системи. Для системи управління гранулятором, керування буде здійснюватись по каналу керування температура гранул – вологовміст. Для досягнення необхідного відсотку вологості, потрібно температуру гранул вивести та тримати на встановленому рівні на протязі всього процесу грануляції.

Як можна побачити на рисунку 4.3, зі збільшенням температури гранул їх вологовміст зменшується, що і відповідає реальному процесу.

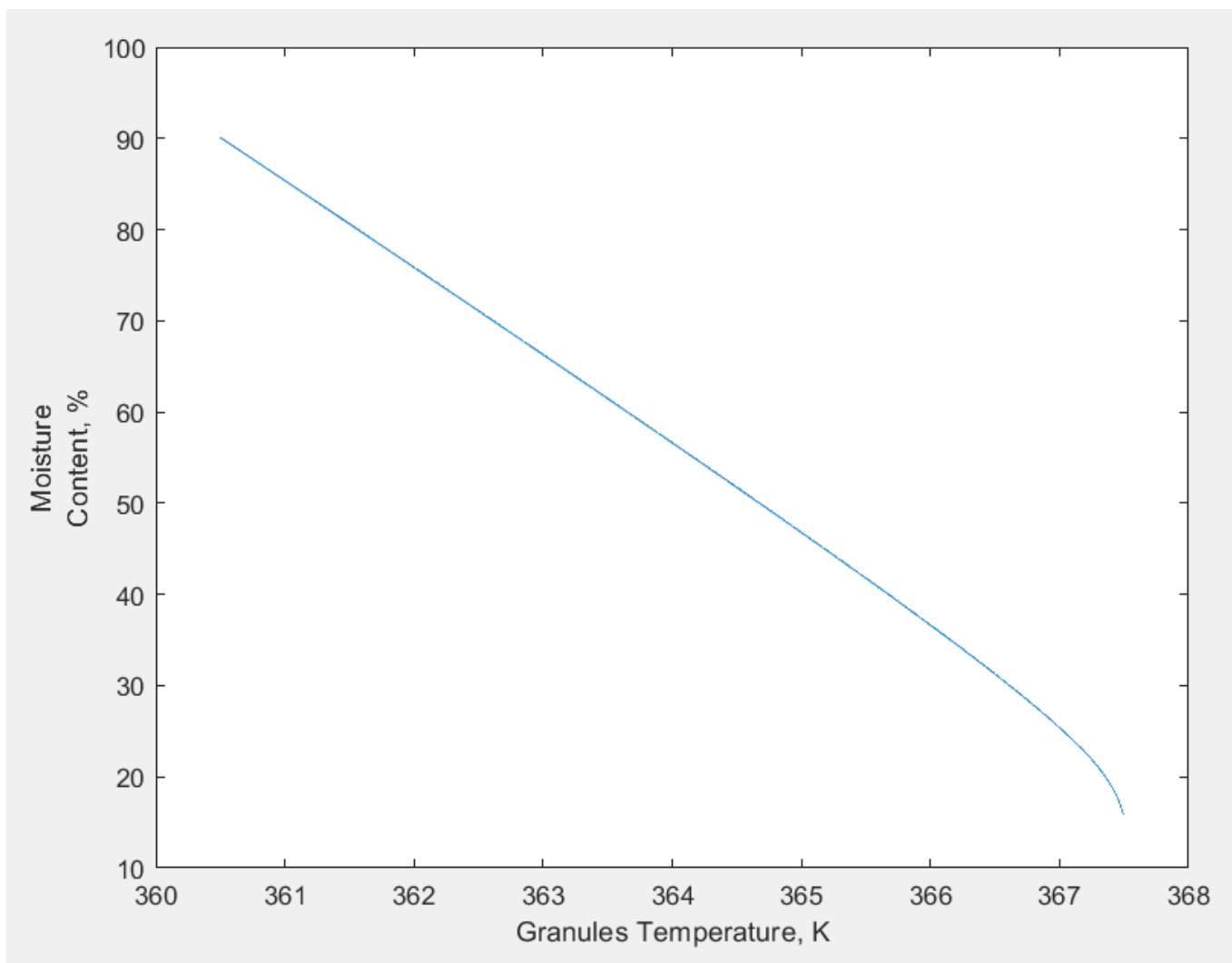


Рисунок 4.3 – Залежність вологовмісту від температури гранул

Для отримання передаточної функції з розробленої математичної моделі, необхідно провести лінеаризацію моделі, але так як в моделі присутні похідні по ширині та величині апарату із псевдозрідженим шаром, то виконання лінеаризації стає досить складною та трудомісткою задачею. Існує ще один спосіб отримати передавальну функцію системи – System Identification Toolbox (SIT), що входить до складу пакету Matlab. SIT дає можливість отримати динамічну модель системи на основі експериментальних даних входів та виходів системи. На вхід та вихід системи подамо значення температури гранул та вологовмісту, відповідно, отриманих в процесі моделювання роботи гранулятора розробленою математичною моделлю на основі даних які використовуються в грануляторах на виробництві.

На рисунку 4.5 показано інтерфейс користувача. В лівому верхньому куті зображено імпортовані дані на основі яких буде синтезуватися передавальна функція системи.

SIT дає змогу побудувати графіки імпортованих даних, частотні функції, спектр даних. Якщо виділити декілька моделей в вікні Import models, користувач може порівняти їх на графіку та обрати оптимальну для його випадку модель

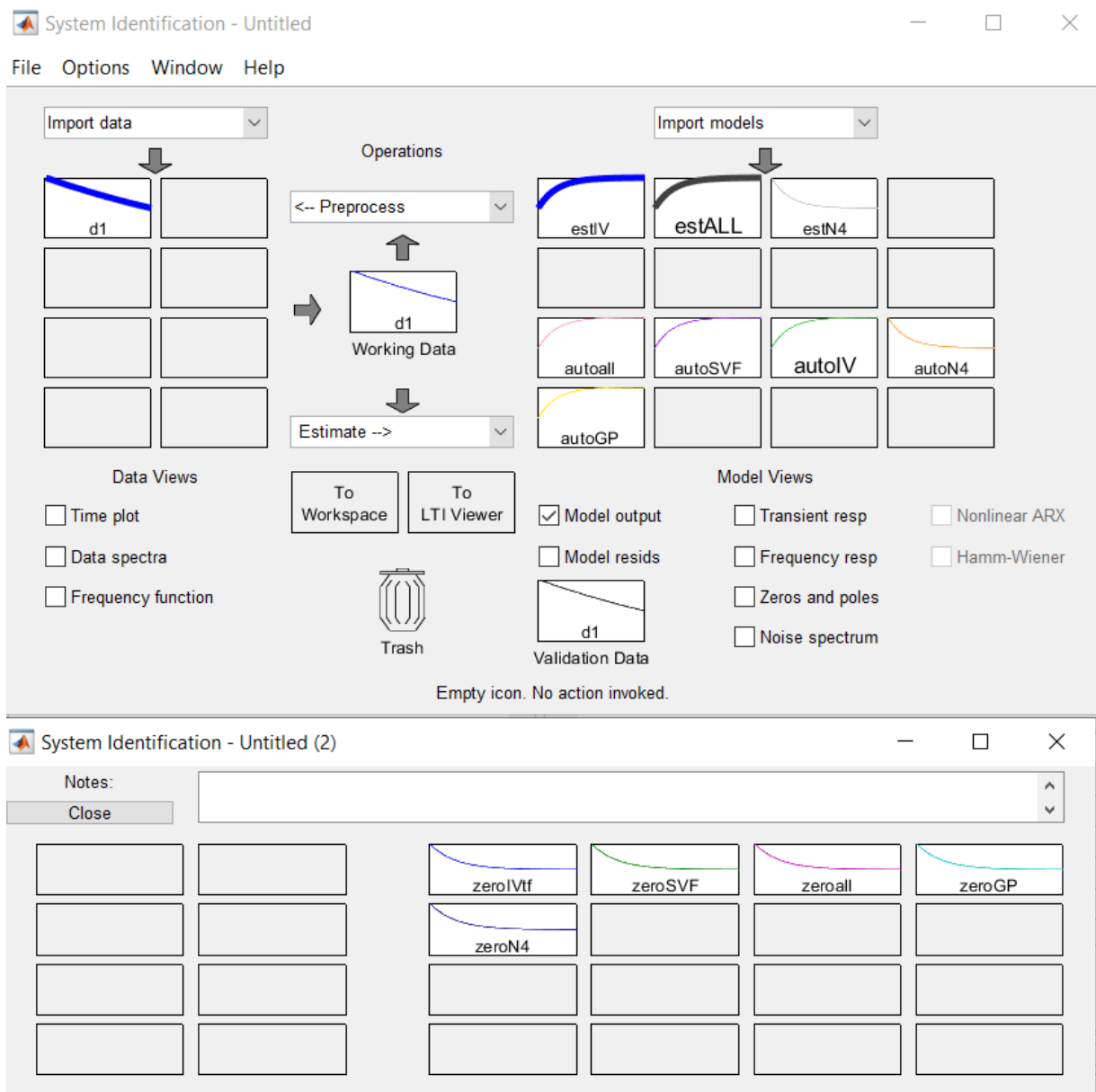


Рисунок 4.5 – Інтерфейс користувача SIT

Як можна побачити на рисунку 4.4, побудовані графіки по експериментальним даним. Вони повністю ідентичні з графіками які отримані при моделюванні математичної моделі (рисунки 3.5 – 3.6).

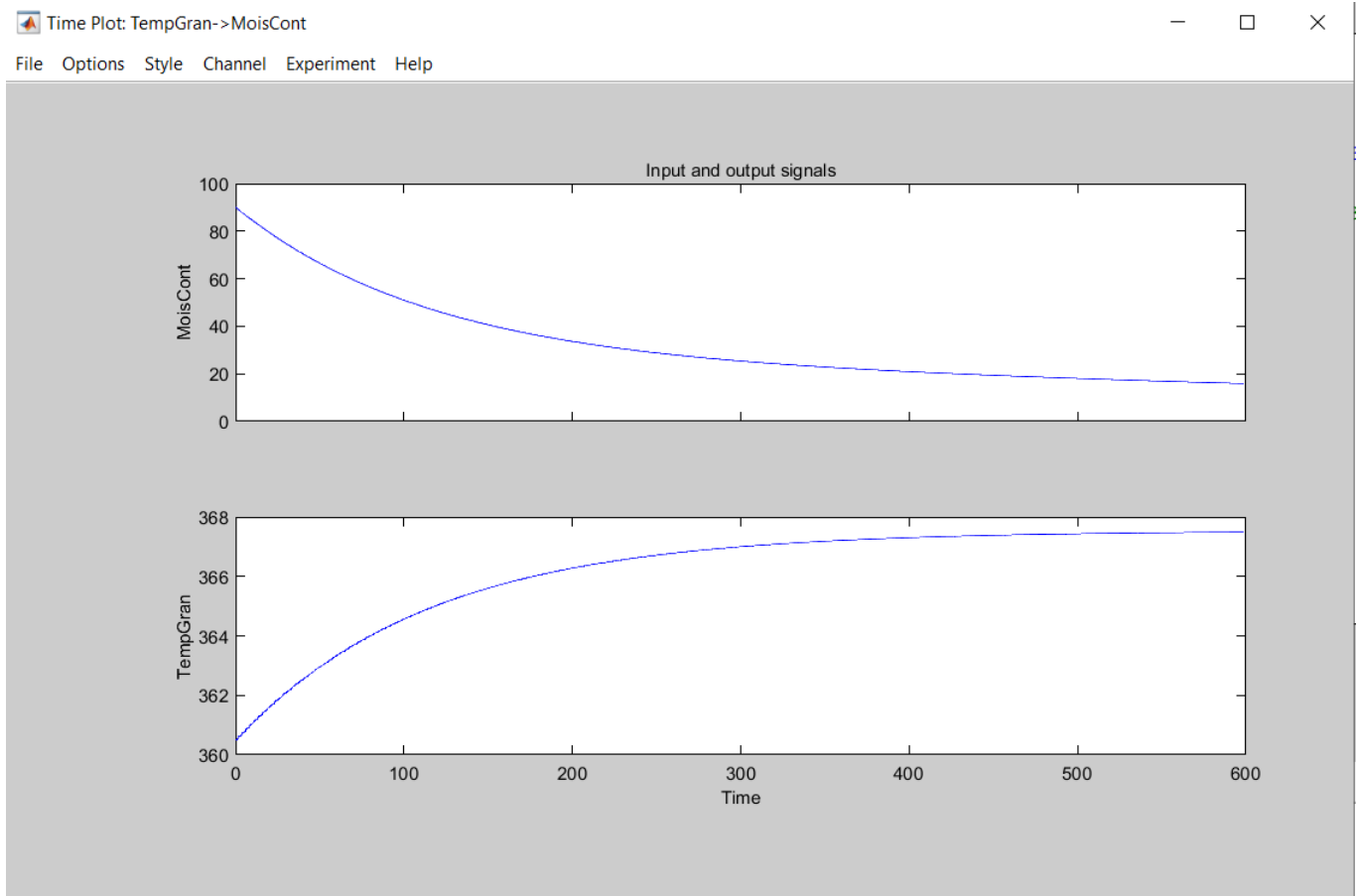


Рисунок 4.4 – Залежності вологовмісту та температури гранул від часу в SIT

Для створення передаточної функції SIT пропонує користувачеві обрати початковий стан системи (рисунок 4.5) та метод ініціалізації (рисунок 4.6).

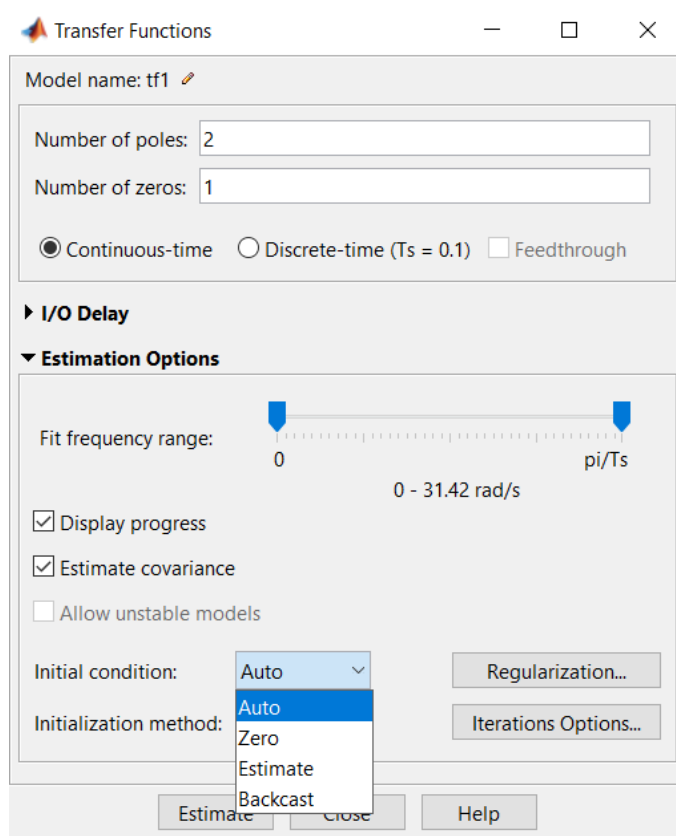


Рисунок 4.5 – Вибір початкового стану системи

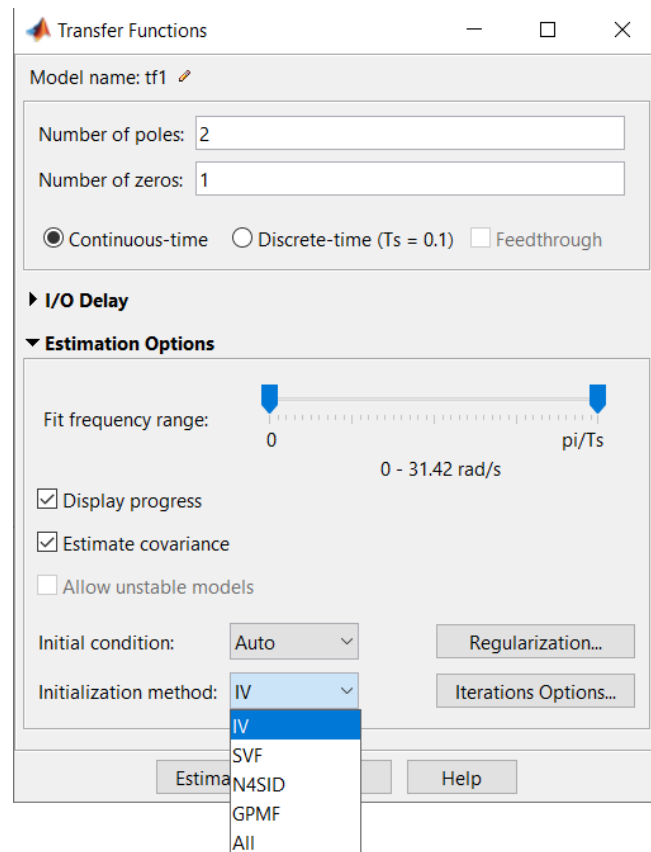


Рисунок 4.6 – Вибір методу ініціалізації

За допомогою різних комбінації з початкового стану системи та методів ініціалізації отримано 13 передаточних функцій. Щоб визначити, яка саме комбінація дає найкращий результат, необхідно відобразити графіки параметру вологовмісту на виході моделі, які отримані за допомогою передаточних функцій.

Як можна побачити на рисунку 4.7 не всі отримані передаточні функції з належною точністю відображають вологовміст в гранулах. На правій частині рисунка 4.7 представлена точність кожного методу.

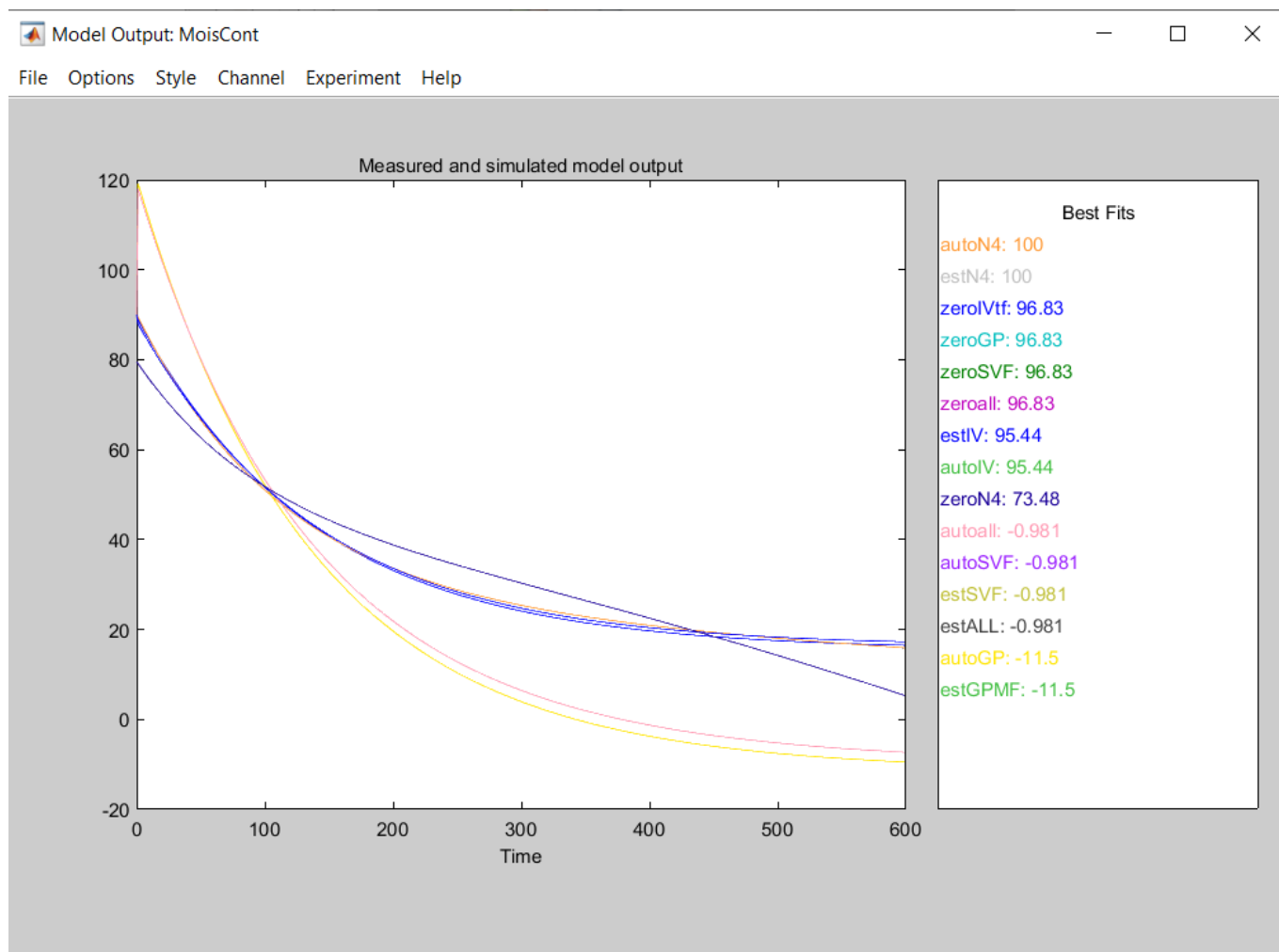


Рисунок 4.7 – Порівняння графіків вологовмісту на виході моделі

Виходячи з отриманих даних, обрано дві передаточні функції які з достатньою точністю 96.86% та 95.44% відповідно, відображають вологовміст гранул на виході моделі – autoIV та zeroall (рисунок 4.8).

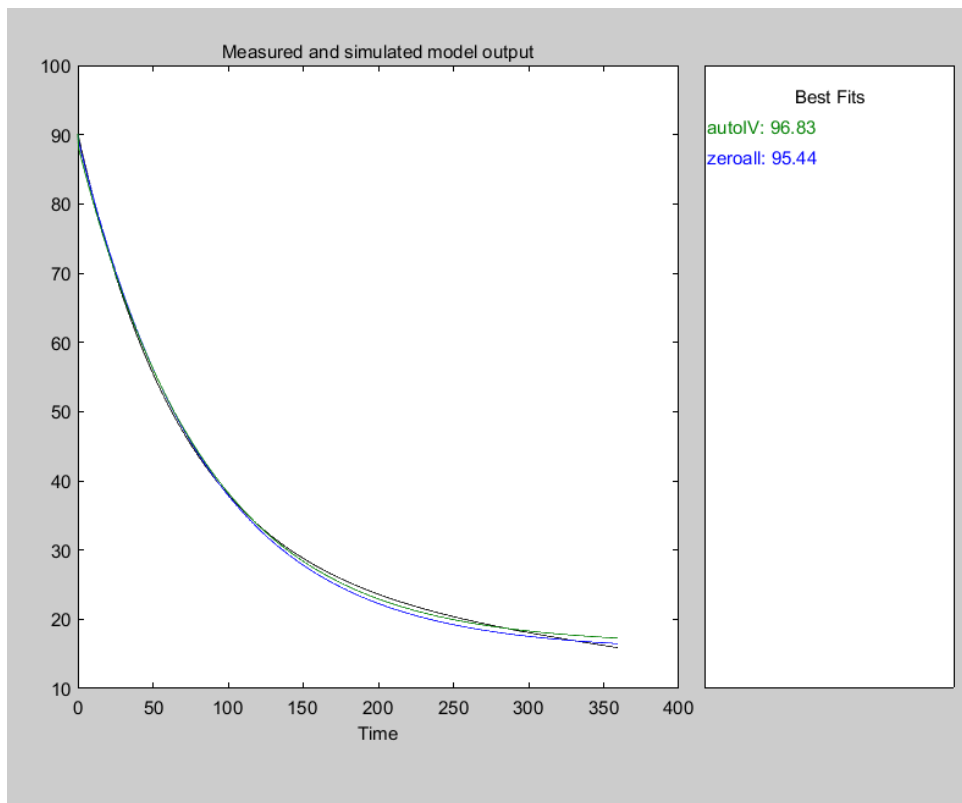


Рисунок 4.8 – Графіки значень керованої величини передаточними функціями

Значення помилок на виході системи зображено на рисунку 4.9.

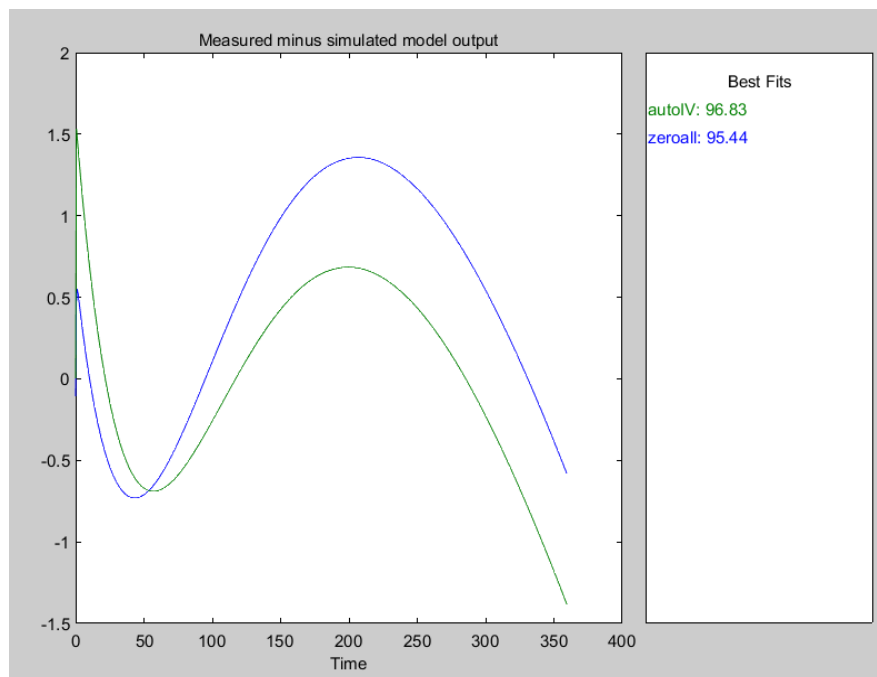


Рисунок 4.9 – Значення помилок на виході системи

Отже виходячи з отриманих даних, для реалізації системи керування, оберемо передавальну функцію autoIV тому, що графік вологовмісту, отриманий на виході моделі найкраще співпадає з експериментальними даними.

Отримана передавальна функція має вигляд (формула 4.1):

$$W(s) = \frac{20.72s + 0.04553}{s^2 + 84.42s + 1.026} \quad (4.1)$$

На рисунку 4.10 показана інформація про передавальну функцію із SIT.

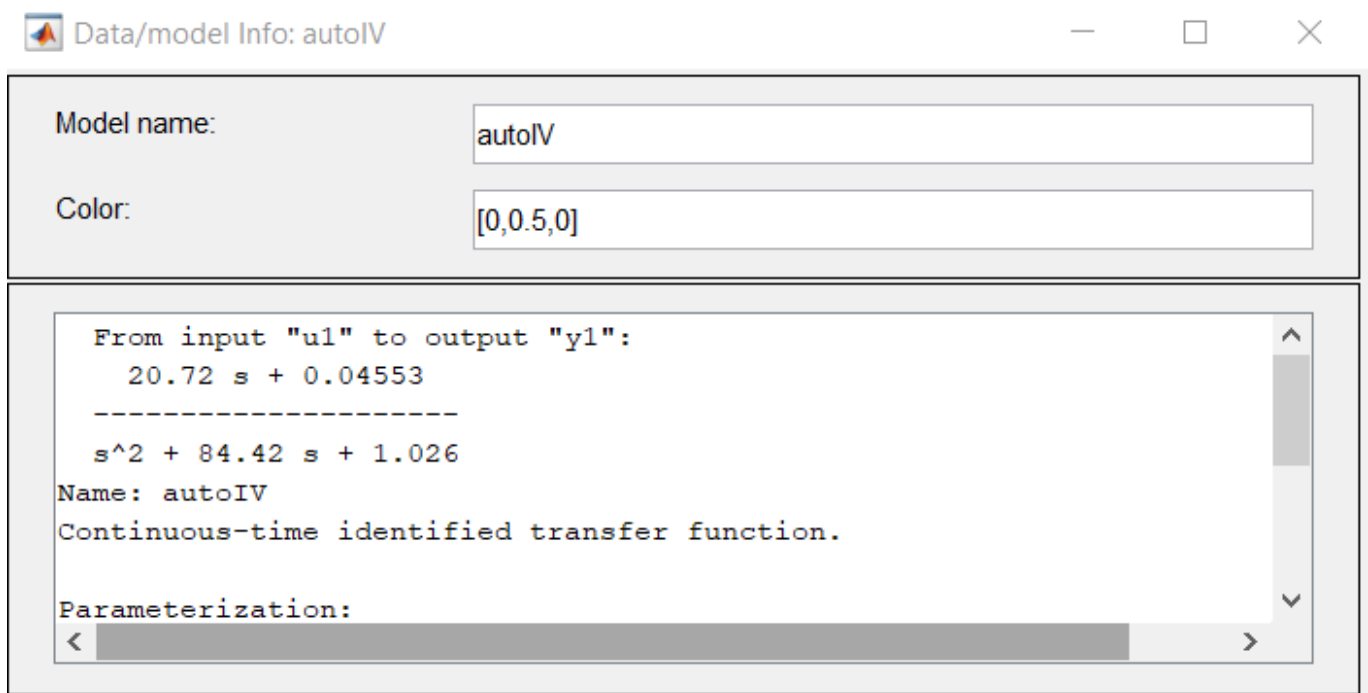


Рисунок 4.10 – Вікно інформації про передавальну функцію в SIT

З графіку перехідної характеристики на рисунку 4.11 видно, що передавальна функція стійка, та її можна використовувати для побудови системи управління.

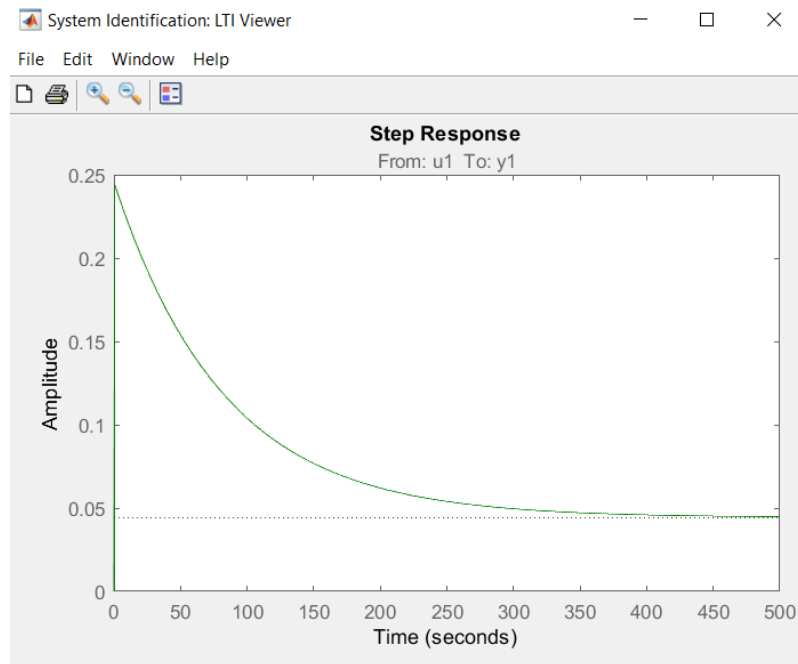


Рисунок 4.11 – Графік передавальної функції об’єкта управління

4.2 Система управління з ПІ – регулятором

Лінійний пропорційно – інтегральний регулятор із зворотнім зв’язком є одним із найбільш універсальних та часто використовуваних регуляторів. Проєктування даного регулятора досить простий, а висока продуктивність дозволяє використовувати його в різних галузях промисловості.

Враховуючи замкнутий контур управління з одним входом та одним виходом показаний на рисунку 4.12 передавальна функція замкнутого контуру, в якій завдання r подається на керований вихід у визначається як G_{ry} та показана на формулі 4.2.

$$G_{ry}(s) = (1 + P(s)C(s))^{-1}P(s)C(s) \quad (4.2)$$

де $P(s)$ – передавальна функція об’єкта управління,

$C(s)$ – передавальна функція регулятора, що проєктується.

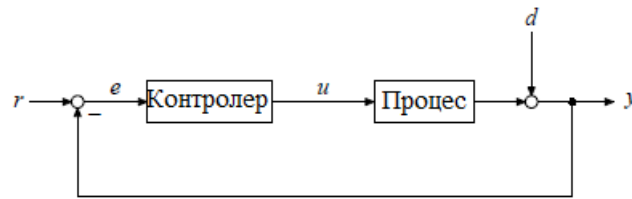


Рисунок 4.12 – Стандартна конфігурація системи управління зі зворотним зв'язком, яка використовується для проектування пропорційно – інтегральних контролерів зворотного зв'язку

Ідея пропорційно – інтегрального регулятора зворотного зв'язку полягає в обчисленні керуючої змінної від помилки регулювання з урахуванням двох паралельних впливів: пропорційна частина обчислює керувану змінну виходячи виключно з поточної помилки керування, тоді як інтегральна частина підсумовує загальну помилку за попередньо визначений часовий горизонт і обчислює керуючу змінну на основі цієї інформації. Пропорційна частина додає динаміки контролера; інтегральна частина додає точності контролера, оскільки інтеграл помилки зникає лише тоді, коли помилка за часовий горизонт зникає. Обидві частини з'єднані паралельно для обчислення керуючої змінної з помилки керування.

Гнучкий зворотній зв'язок дозволяє виключити надлишкову нерівномірність у перехідному процесі. В залежності від налаштування параметрів регулятора на динамічних властивостей об'єкта керування перехідний процес може бути як коливальним затухаючим так і аперіодичним. Існує залежність між амплітудою перерегулювання та тривалістю перехідного процесу: чим більший час перехідного процесу – тим менша амплітуда перерегулювання і навпаки.

Формула ПІ – регулятора в Matlab має вигляд зображений на формулі 4.3:

$$C = K_p + K_i \frac{1}{s} \quad (4.3)$$

де K_p – значення пропорційної складової,

K_i – значення інтегральної складової.

Головне завдання, яке ставить перед системою управління – виведення на заданий рівень та підтримка постійного значення температури гранул.

Розрахунок ПІ – регулятора виконано за допомогою пакету програмного забезпечення, Matlab PID Tuner. Даний набір інструментів дозволяє виконувати розрахунок П, ПІ, ПД та ПІД регуляторів, має гнучкий та зрозумілий інтерфейс з можливістю показувати будь – які дані, що можуть знадобитись під час розрахунку регуляторів.

Перед початком розрахунку регулятора, необхідно побудувати схему в Matlab Simulink зображену на рисунку 4.13, яка включає в себе завдання для регулятора, сам ПІ – регулятор, передавальну функцію гранулятора та блок Step, що дозволяє отримати графік перехідного процесу.

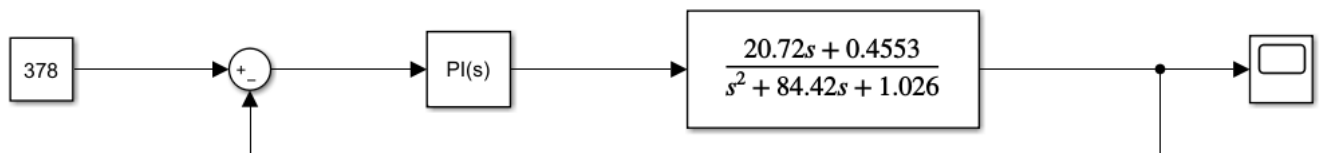


Рисунок 4.13 – Схема системи управління з ПІ – регулятором

Перехідна характеристика системи з неналаштованим регулятором має вигляд, зображений на рисунку 4.14. Можна зробити висновок, що регулятор зовсім некоректно керує процесом нагрівання гранул, температура гранул зростає до занадто високих показників, що є неприпустимо для даного процесу.

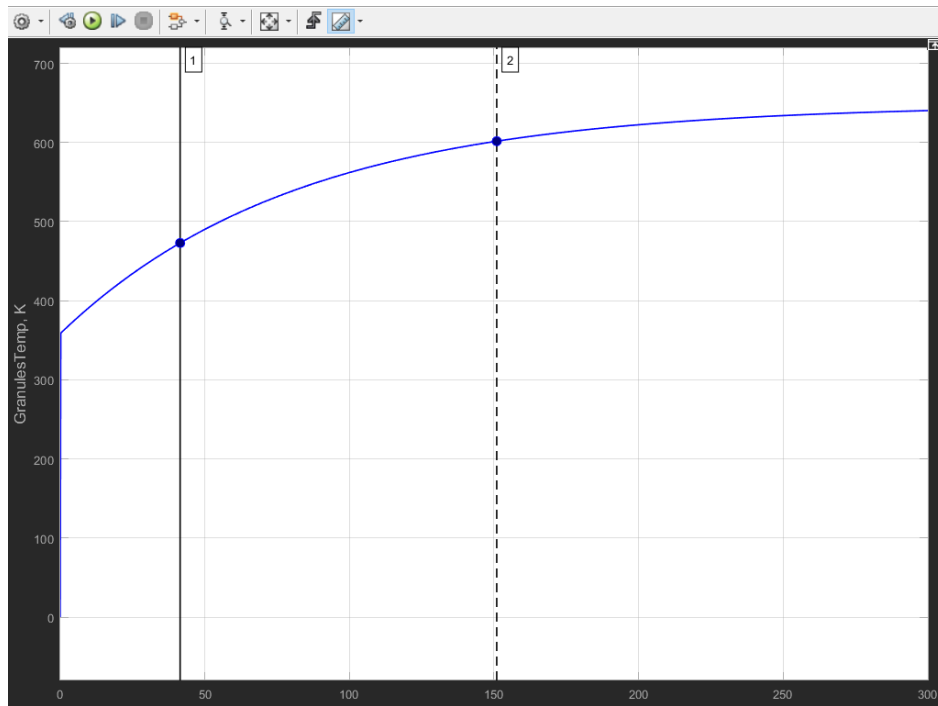


Рисунок 4.14 – Графік керування температурою гранул системою управління з неналаштованим регулятором

Вікно налаштування ПІ регулятора зображено на рисунку 4.15, за допомогою повзунків Response Time та Transisten Behavior необхідно підібрати коефіцієнти регулятора таким чином, щоб перехідна характеристика регулятора була стійкою, перегулювання мінімальне, а час переходу в усталений режим не перевищував 250 секунд. Час встановлення не повинен також бути занадто малим, так як з фізичної точки зору неможливо досягти заданої температури гранул за досить короткий час.

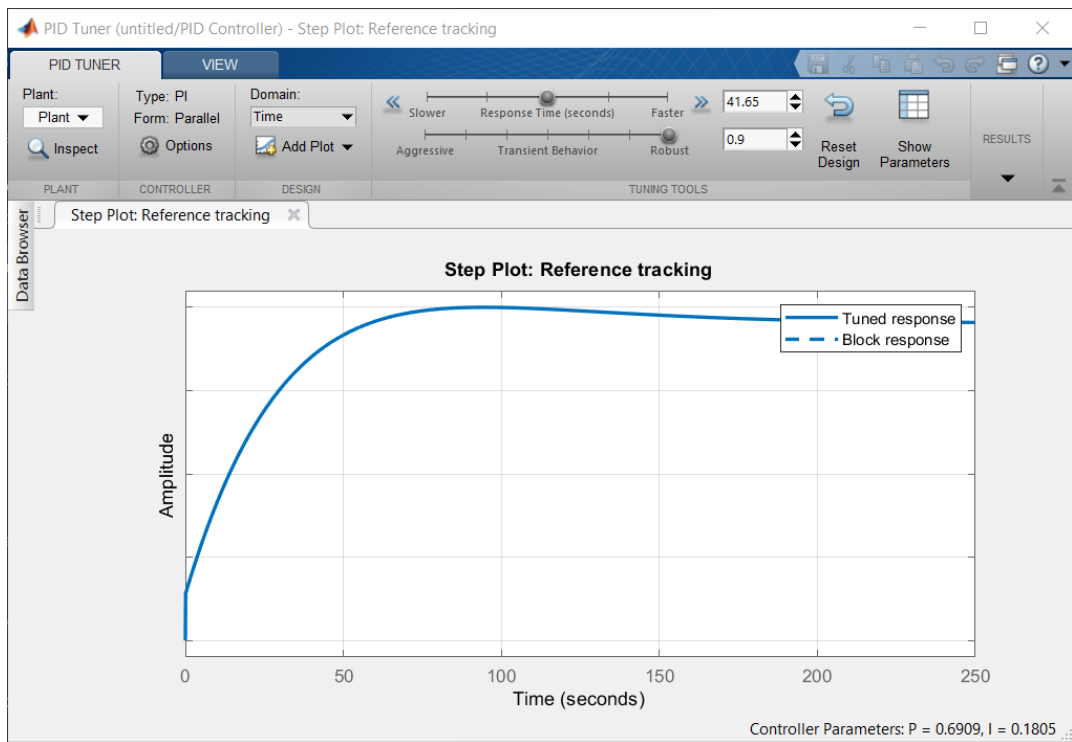


Рисунок 4.15 – Перехідна характеристика ПІ – регулятора

Коефіцієнти ПІ – регулятора, розраховані за допомогою PID Tuner зображені на рисунку 4.16.

| Controller Parameters | | |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Tuned | Block |
| P | 0.6909 | 0.6909 |
| I | 0.18046 | 0.18046 |
| D | n/a | n/a |
| N | n/a | n/a |
| | | |
| Performance and Robustness | | |
| | Tuned | Block |
| Rise time | 40.8 seconds | 40.8 seconds |
| Settling time | 159 seconds | 159 seconds |
| Overshoot | 4.89 % | 4.89 % |
| Peak | 1.05 | 1.05 |
| Gain margin | Inf dB @ NaN rad/s | Inf dB @ NaN rad/s |
| Phase margin | 90 deg @ 0.048 rad... | 90 deg @ 0.048 rad... |
| Closed-loop stability | Stable | Stable |

Рисунок 4.16 – Значення коефіцієнтів ПІ – регулятора

Як можна побачити з рисунка 4.16, система стабільна, час усталення 159 секунд, а коефіцієнти, що відповідають за пропорціональну та інтегральну складову мають значення: $K_p = 0.6909$ та $K_i = 0.18046$.

Формула розрахованого ПІ – регулятора в Matlab має вигляд (формула 4.4):

$$C = 0.6909 + 0.18064 \frac{1}{s} \quad (4.4)$$

На рисунку 4.17 зображено графік значень керованої величини (температури гранул) з використанням розрахованого ПІ – регулятора.

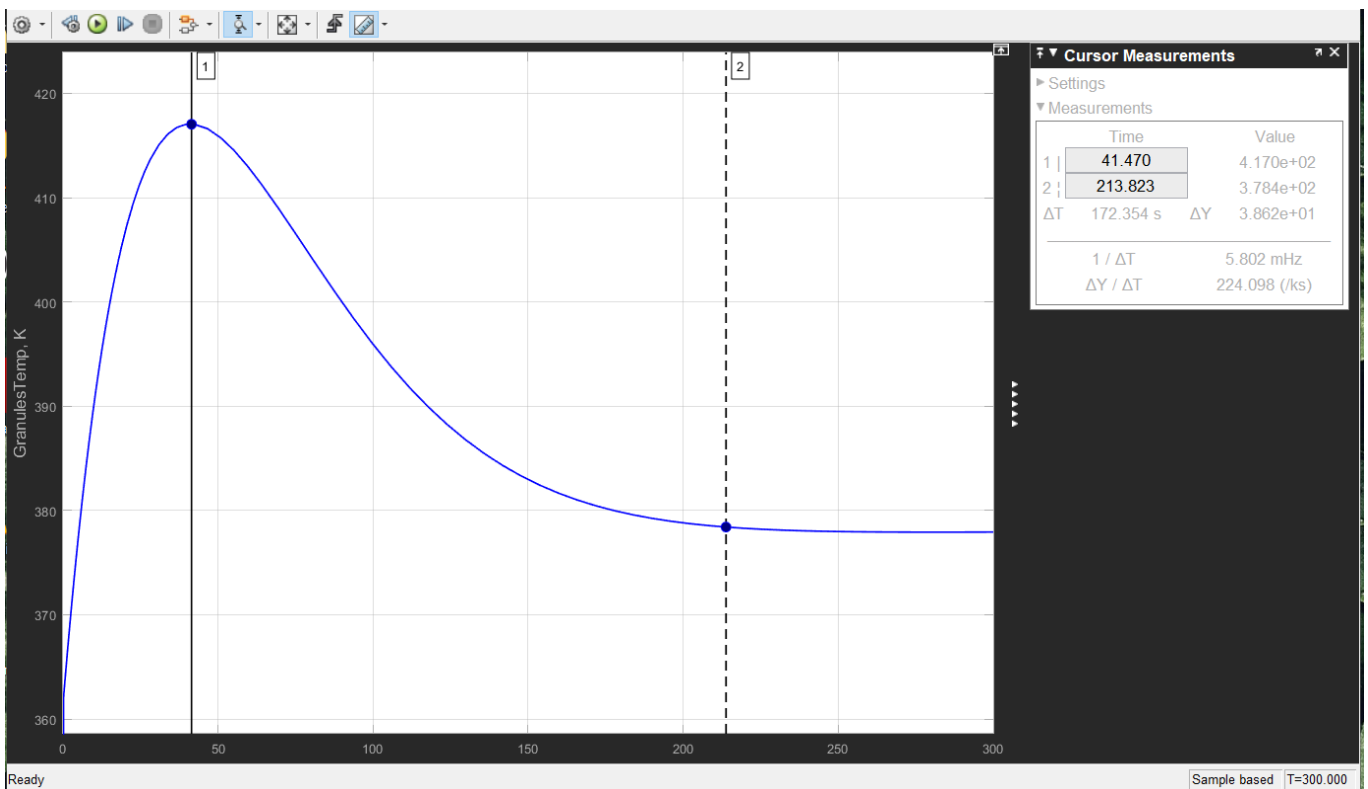


Рисунок 4.17 – Графік зміни значення керованої величини

Проаналізувавши отриманий графік, можна сказати, що система управління на основі ПІ – регулятора виконує поставлене завдання, температура гранул виходить

до заданого рівня (378 K) за 213 секунд та підтримується на протязі всього процесу, але присутнє перерегулювання 9.3%.

4.3 Система управління з ПД – регулятором

ПД – регулятори використовуються в широкому спектрі завдань для управління виробничими процесами. Приблизно 95% операцій промислової автоматики із замкнутим контуром використовують ПД – регулятори. ПД означає пропорційно – інтегрально – похідний. Ці три регулятори об'єднані таким чином, що він видає керуючий сигнал.

Як контролер зворотного зв'язку, він забезпечує керуючий вихід на бажаних рівнях. До винаходу мікропроцесорів ПД – управління здійснювалося аналоговими електронними компонентами. Але сьогодні всі ПД – регулятори обробляються мікропроцесорами. Програмовані логічні контролери також мають вбудовані інструкції ПД – регулятора. Завдяки гнучкості і надійності ПД – регуляторів вони традиційно використовуються в програмах управління процесами.

ПД – регулятор підтримує вихідний сигнал таким чином, що між операційними змінними і заданим значенням або бажаним виходом при операціях із замкнутим контуром виникає нульова помилка. ПД – регулятор використовує три основних керуючих поведінки, які описані нижче.

Пропорційний або P – регулятор видає вихідне значення, яке пропорційне поточній помилці $e(t)$. Він порівнює бажане або задане значення з фактичним значенням або значенням процесу зворотного зв'язку. Отримана помилка множиться на пропорційну константу, щоб отримати новий результат. Якщо значення помилки дорівнює нулю, то вихід цього контролера дорівнює нулю

Він забезпечує стабільну роботу, але завжди підтримує помилку усталеного стану. Швидкість відгуку збільшується, коли збільшується пропорційна константа K_p . Через обмеження П – контролера, де завжди існує зсув між змінною процесу і заданим значенням, необхідний І – контролер, який забезпечує необхідні дії для усунення

помилки усталеного стану. Він інтегрує помилку за період часу, поки значення помилки не досягне нуля. Він містить значення для кінцевого пристрою управління, при якому помилка стає рівною нулю.

Інтегральний контроль зменшує його вихід при виникненні негативної помилки. Це обмежує швидкість реакції і впливає на стабільність системи. Швидкість відгуку збільшується за рахунок зменшення інтегральної складової K_i .

I – регулятор не має можливості передбачити майбутню поведінку помилки. Таким чином, він реагує нормально після зміни заданого значення. D – регулятор долає цю проблему, передбачаючи подальшу поведінку помилки. Його вихід залежить від швидкості зміни помилки за часом, помноженої на постійну похідну.

ПД – регулятор складається з трьох управлінь, а саме пропорційного, інтегрального і похідного управління. Спільна робота цих трьох контролерів дає стратегію управління процесом управління. ПД – регулятор управляє змінними процесу, такими як тиск, швидкість, температура, витрата і т.

Структура системи управління з ПД – регулятором складається з ПД – регулятора, який передає свій вихід в блок процесу. Процес або технологічна установка складається з кінцевих керуючих пристроїв, таких як виконавчі механізми, регулюючі клапани та інші керуючі пристрої для управління різними процесами в промисловості або на підприємстві.

Система управління з ПД – регулятором включає в себе передавальну функцію гранулятора, вбудований блок ПД – регулятора, блок Scope для отримання графіків управління температурою та блок, що задає значення температури, яке регулятор повинен підтримувати на протязі всього процесу. Схему системи управління зображено на рисунку 4.18.

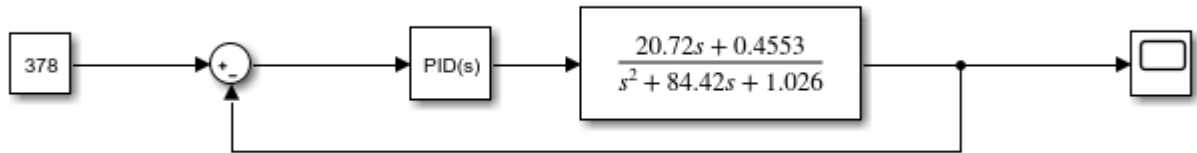


Рисунок 4.18 – Схема системи управління з ПДД – регулятором.

Розрахунок коефіцієнтів ПДД – регулятора відбувається в за допомогою вбудованого в пакет Matlab PID Tuner. Підбір параметрів відбувається таким самим шляхом як і для ПІ – регулятора.

Формула ПДД – регулятора в Matlab має вигляд (формула 4.5):

$$C = Kp + Ki \cdot \frac{1}{s} + Kd \cdot \frac{s}{Tf \cdot s + 1} \quad (4.5)$$

Перехідна характеристика налаштованого ПДД – регулятора та його параметри зображені на рисунку 4.19.

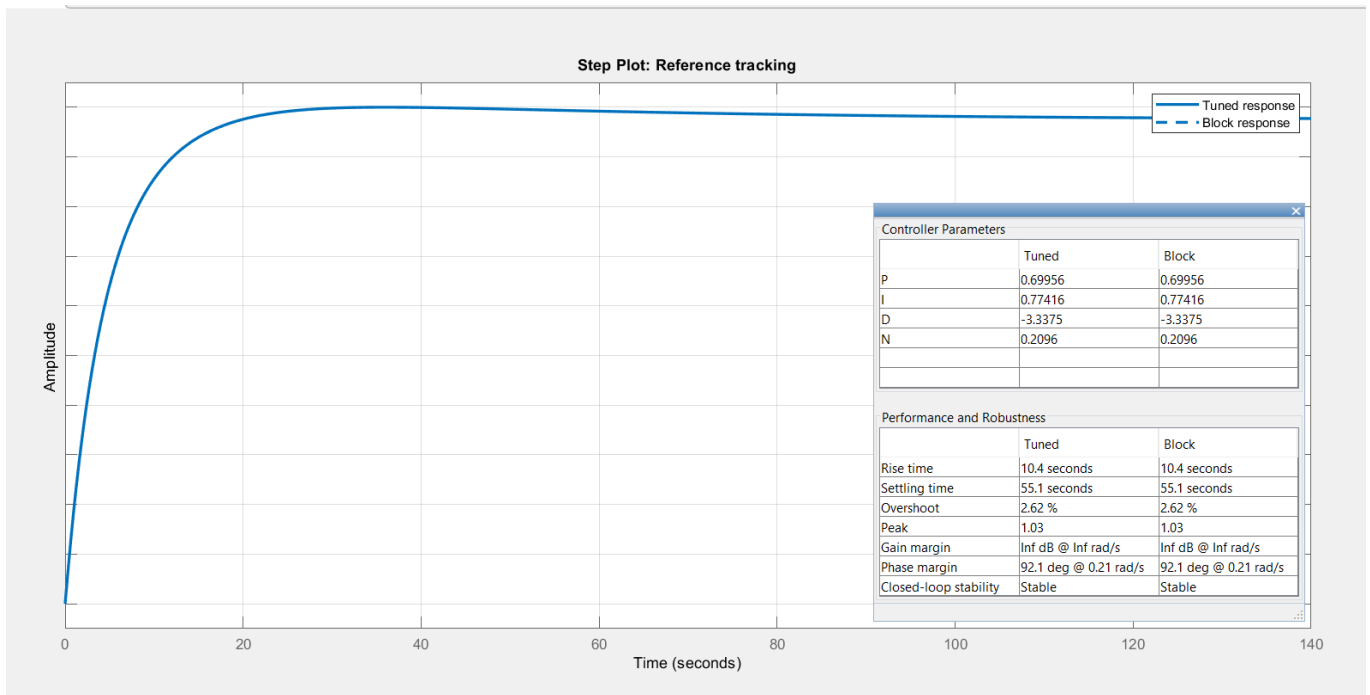


Рисунок 4.19 – Перехідна характеристика ПД – регулятора та його параметри

Коефіцієнти, що відповідають за пропорційну, інтегральну та диференціальну складову мають значення: $K_p = 0.699$, $K_i = 0.774$, $K_d = -3.337$, $T_f = 4.77$.

Формула розрахованого ПД – регулятора має вигляд (формула 4.6):

$$C = 0.699 + 0.774 \cdot \frac{1}{s} - 3.337 \cdot \frac{s}{4.77s+1} \quad (4.6)$$

Як можна побачити на графіку перехідної характеристики ПД – регулятора, перехідна характеристика стабільна, перерегулювання становить 2.62% а в усталений режим він переходить за 55.1 секунду, що значно швидше ніж у ПІ – регулятора.

На рисунку 4.20 зображено графік значень температури гранул, що контролюється за допомогою розрахованого ПД – регулятора.

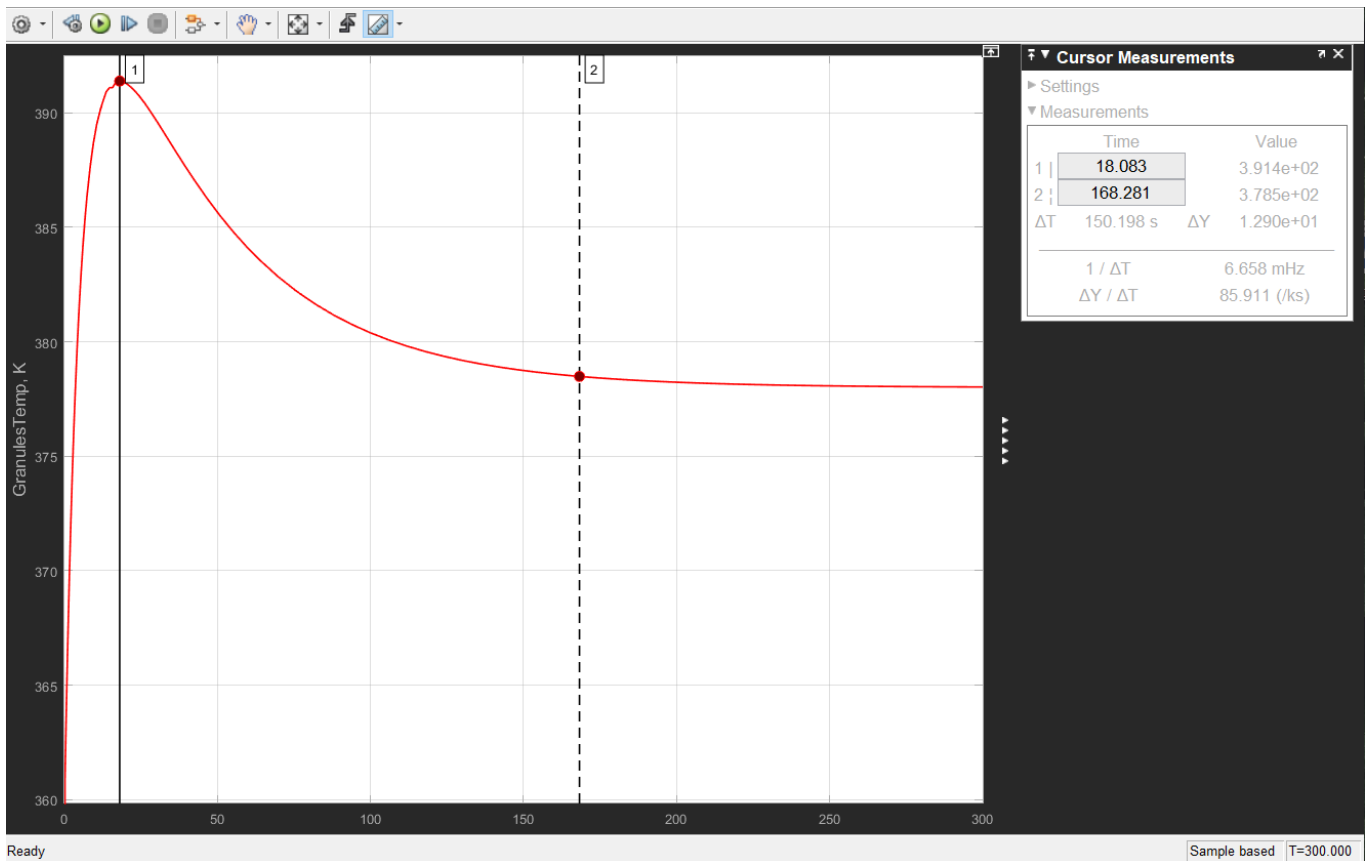


Рисунок 4.20 – Графік зміни значень температури гранул при керуванні ПІД – регулятором

З графіка видно, що система управління гранулятором стабільна, задане значення температури гранул досягається за 168с, а перерегулювання становить 3,5%.

Для розуміння, який краще регулятор використовувати в системі управління, порівняємо та проаналізуємо результати управління температурою гранул ПІ та ПІД регуляторами. Критерії, за якими будуть оцінюватися регулятори це: час виходу на задану температуру, перерегулювання та похибка.

Для порівнянн результатів роботи двох регуляторів побудовано схему в Simulink, яка зображена в додатку В.

На рисунку 4.21 показано результати роботи двох регуляторів. Синім кольором зображено керування, що здійснюється ПІ – регулятором, червоним – ПІД. Можна зробити висновок, що ПІД – регулятор швидше виходить на задану температуру, та

має менше перерегулювання ніж ПІ – регулятор. Похибка в обох випадках відсутня. Тому для системи управління виробництвом мінеральних добрив краще всього підходить ПІД – регулятор.

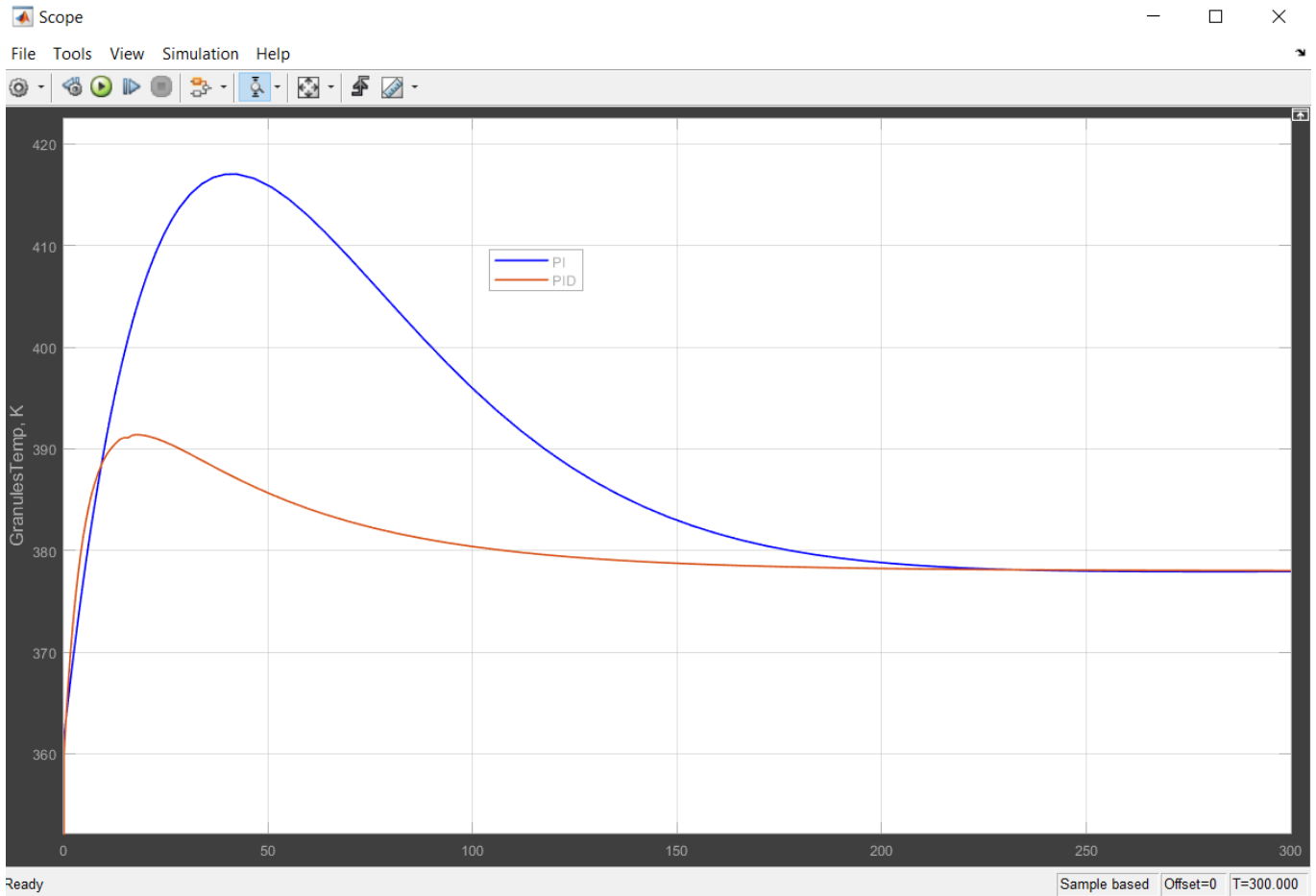


Рисунок 4.21 – Порівняння роботи ПІ та ПІД – регуляторів

5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

5.1 Опис ідеї стартап – проекту

Зростання потреб людства у продовольстві ставить перед виробниками вимоги щодо підвищення врожайності основних сільськогосподарських культур. Для досягнення цієї мети аграрному сектору необхідно активне використання різних типів мінеральних добрив нового покоління. Хімічне виробництво належить до найбільш інноваційних та наукоємних галузей промисловості. При щорічному збільшенні попиту на мінеральні добрива на 5–8 % особлива увага приділяється якості готового продукту, яка визначається рівномірним розподіленням макро- і мікрокомпонентів по всьому об'єму гранул, розміри яких знаходяться в межах 1,8–4,5 мм і мають міцність більше 10 Н на гранулу. Гранули із найліпшою структурою та агрохімічними властивостями мають розмір від 2 до 3 мм. Мінеральні добрива модифіковані необхідними мінеральними та органічними домішками із заданими властивостями найбільш доцільно отримувати шляхом зневоднення і грануляції в апаратах із псевдозрідженим шаром [17].

Впровадження нових інформаційних технологій та інформаційно-комунікаційних систем та мереж дозволяє значно підвищити ефективність технологічних процесів виробництва мінеральних добрив. Особливе значення має реалізація інформаційних технологій для систем управління виробництвом мінеральних добрив. Складність технологічних процесів гранулювання у псевдозрідженому шарі під час виробництва мінеральних добрив зумовлює потребу дослідження різних математичних моделей, які б описували процеси на мікрорівні, на макрорівні, для задач керування та оптимізації. Оптимізація процесу виробництва мінеральних добрив враховує різноманітні задачі складного виробництва: покращення умов гідродинаміки шару, мінімізацію витрат теплоносія, підвищення ефективності процесу, зменшення вартості процесу переробки [17].

Протягом останніх 15 років внаслідок дії кризових факторів у сільському господарстві України суттєво зріс дефіцит азотних, фосфорних, калійних комплексних мінеральних добрив. Повноцінний урожай сільськогосподарських культур без

використання добрив та сівозмін є майже неможливим. Для вирішення агроекологічних проблем, відновлення й підвищення родючості ґрунтів особливу увагу слід звернути на внесення органічної речовини в ґрунт у формі сучасних ефективних комплексних органо-мінеральних добрив, складовими компонентами яких є основні елементи мінерального живлення рослин (азот, фосфор, калій), мікродомішки та органічні гуміновмісні речовини (торф, сапропель, буре вугілля). Це дозволить поєднати корисні властивості органічних і мінеральних добрив, уникнувши недоліків, характерних для кожного з них. У технології виробництва мінеральних добрив однією з основних стадій формування якості продукту є гранулоутворення з подальшою чи одночасною стабілізацією структури (сушінням або охолодженням) та виділенням товарної фракції. У багатьох випадках як енергоефективну застосовують техніку псевдозрідження [18].

Існує низка підходів до математичного моделювання зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. Для задачі оптимізації запропоновано використовувати математичну модель, що враховує взаємозв'язок між різними параметрами процесу за наявності двох фазових переходів - видалення розчинника та утворення шару мікрокристалів на поверхні гранул [18].

Промислова експлуатація грануляторів із псевдозрідженим шаром свідчить, що на надійну роботу такої технологічної системи впливає велика кількість чинників. Їх вплив на стійкість роботи технологічної системи виробництва добрив із заданими властивостями дотепер вивчено не повністю. Попри те, що деякі виробництва працюють понад 25 років, оптимальні режими ведення гранулювання й зневоднення не знайдені [18].

У таблиці 5.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап – проекту

| Зміст ідеї | Напрямки застосування | Вигоди для користувача |
|------------|-----------------------|---|
| | | Висока якість добрив |
| | | Значно менша кількість бракованого продукту |

Запропоновано абсолютно новий спосіб автоматичного управління процесом грануляції та зневоднення у псевдозрідженому шарі шляхом ефективного керування температурою гранул та їх вологовмісту, який відрізняється тим, що підвищення якості виготовленого продукту у процесі зневоднення і гранулюючої розчину у псевдозрідженому шарі здійснюється за рахунок вимірювання температури повітря яким псевдозріджується шар під час процесу та корекцією вологовмісту грануляту. Завдяки такому способу автоматичного управління можна отримати продукт високої якості та низьким відсотком браку.

5.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик

Провівши аналіз техніко – економічних переваг запропонованої ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів, виділимо основні пункти, за якими визначимо сильні, слабкі та нейтральні сторони:

- визначити техніко – економічні властивості запропонованої ідеї;
- визначити основних конкурентів, зібрати інформацію щодо значень техніко – економічних показників для ідеї власного проекту;
- провести порівняльний аналіз показників для власної ідеї.

За допомогою проведеного аналізу визначено показники, що мають гірші значення (W), аналогічні (N) значення та кращі значення (S) (таблиця 5.2).

Таблиця 5.2 – Визначення характеристик ідеї проекту

| № п/п | Техніко – економічні характеристик и ідеї | Товари/концепції конкурентів | | | | W | Z | S |
|----------|--|------------------------------|-----------------|----------------|----------------|---|---|---|
| | | Мій проект | Конкурен т 1 | Конкурент 2 | Конкурент 3 | | | |
| 1. | Вартість технічних засобів автоматизації | 8500 | 10000 | 5500 | 6000 | – | + | – |
| 2. | Швидкість встановлення | 6 | 7 | 11 | 13 | – | – | + |
| 3. | Діаметр гранул | 1 | 4 | 5 | 8 | – | – | + |
| 4. | Відсоток браку | 15 | 25 | 35 | 35 | – | – | + |
| 5. | Однорідність гранул | Дуже висок а | Середня | Задовільн а | Середня | – | – | – |

Визначено слабкі, сильні та нейтральні характеристики і властивості ідеї товару. Використовуючи дані характеристики можна сформувати конкурентноспроможність виготовленого товару.

5.3 Технологічний аудит ідеї проекту

Автоматизовану систему управління апаратом із псевдозрідженим шаром наведено в додатку А.

Спосіб управління процесом грануляції та зневоднення у грануляторі із псевдозрідженим шаром шляхом контролю температури гранул та їх вологовмісту, який відрізняється тим, що підвищення якості виготовленого

продукту у процесі зневоднення і гранулювання суспензії у псевдозрідженому шарі здійснюється за рахунок вимірювання температури гранул та їх вологості перед початком процесу, під час процесу та наприкінці процесу сушки у псевдозрідженому шарі із подільшою їх корекцією за допомогою розроблених ПІ та ПД – регуляторів.

5.4 Характеристика потенційних клієнтів

Проведемо визначення ринкових можливостей, які можна використати для ринкового впровадження проекту, та загрози, що можуть перешкодити реалізації проекту.

Це дозволить скорегувати напрямки розвитку проекту із урахуванням стану ринку, потреб потенційних покупців та пропозицій конкурентів.

Перший крок є проведення аналізу попиту: його наявність, динаміка, обсяг, розвитку ринку (таблиця 5.3).

Таблиця 5.3 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап – проекту

| № п/п | Стан ринку | Характеристика |
|-------|---|---------------------------------|
| 1. | Головні гравці, од | 7 |
| 2. | Загальний обсяг продаж, грн/ум.од | 15000 |
| 3. | Динаміка ринку | Зростаюча |
| 4. | Характер обмежень для входу | Масштабність |
| 5. | Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації | ТУ У 24.1 – 37685405 – 001:2011 |
| 6. | Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), % | 85 |

За отриманими із таблиці 5.3 результатами можна зробити висновок що за попереднім оцінюванням ринок є привабливим для входження.

Наступний крок полягає у визначенні потенційних груп клієнтів, їх характеристики, та формування орієнтовного переліку вимог до товару для кожної із груп (таблиця 5.4).

Таблиця 5.4 – Характеристика потенційних клієнтів стартап – проекту

| № п/п | Потреба, що формує ринок | Цільова аудиторія | Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів | Вимоги споживачів до товару |
|----------|-----------------------------------|--|--|---|
| 1. | Добрива високої якості | Агропромислові комплекси, господарства, державний агросектор, приватні підприємці – фермери | ТУ У 24.137685401:2012 | Швидкість виробництва та постачання, доступність, висока якість, однорідність: |

5.5 Фактори загроз та можливостей

Як і в будь-якій сфері виробництва присутні певні загрози. Для попередження таких ситуацій необхідно встановлювати сучасні системи автоматичного управління. Наявність висококваліфікованого обслуговуючого персоналу відіграє важливу роль у зменшенні загроз. Проведення регулярного технічного обслуговування системи управління також відіграє важливу роль у зниженні ризиків (таблиця 5.5).

Таблиця 5.5 – Фактори загроз

| № п/п | Фактори | Загрози | Реакція компанії |
|----------|---|---|---|
| 1 | Низька концентрація сульфату амонію у готовому продукті | Помилка у роботі вимірюючого або регулюючого обладнання | Заміна технічних засобів автоматизації або проведення ремонтних робіт |
| 2 | Малий або занадто великий розмір гранул готового продукту | Поломка мішалки | Заміна технічних засобів автоматизації або проведення ремонтних робіт |
| 3 | Вологовміст гранул більший норми | Вихід з ладу системи управління температурним режимом | Заміна технічних засобів автоматизації або проведення ремонтних робіт |
| 4 | Економічні загрози | Зростання інфляції | Робота над покращенням товару, маркетингова політика |

Окрім загроз також існують і нові можливості (таблиця 5.6).

Таблиця 5.6 – Фактори можливостей

| № п/п | Фактор | Зміст можливості | Можлива реакція компанії |
|----------|--------------|---|------------------------------|
| 1 | Демографічні | Збільшується чисельність населення – збільшується потреба в с/г продукції | Підвищити виробництво товару |

| | | | |
|---|---------------------|---|---|
| 2 | Науково-технічні | Зміна технології виготовлення | Впровадження нової технології виробництва |
| 3 | Соціально-культурні | Не впливає | Не впливає |
| 4 | Природні | Зниження родючості ґрунтів | Покращення якості добрив, збільшення обсягів виробництва |
| 5 | Економічні | Зміна цінової політики виробника грануляторів, підтримка інновацій, підтримка від держави | Зниження або збільшення ціни на продукт, зменшення податків |
| 6 | Політико-правові | Вплив на купівлю продаж товарів та ресурсів для виробництва | Зміна напрямків імпорту/експорту |

5.6 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

На таблиці 5.7 проведено ступеневий аналіз конкуренції на ринку.

Таблиця 5.7 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

| № п/п | Особливості конкурентного середовища | Прояв характеристики | Вплив на діяльність підприємства |
|-------|--------------------------------------|----------------------|----------------------------------|
|-------|--------------------------------------|----------------------|----------------------------------|

| | | | |
|---|------------------------------------|---------------------|---|
| 1 | Визначити тип конкуренції | Монополія | Компанії потрібно робити ставку на розподіл продукції за характеристиками |
| 2 | За рівнем конкурентної боротьби | Національний | Невелика кількість конкурентів. |
| 3 | За галузевою ознакою | Внутрішньо галузева | Наявність потреби в добривах є тільки в аграрному секторі |
| 4 | Конкуренція за видами товарів | Між бажаннями | Різні шляхи задоволення конкретного бажання покупця |
| 5 | За характером конкурентних переваг | Нецінова | Для підвищення конкурентості товару, необхідно підвищувати якість товару, підвищувати продуктивність обладнання та поліпшувати умови реалізації за сталих цін |
| 6 | За інтенсивністю | Марочна | Вирішальним при виборі конкретної продукції є бренд який пропонує високу якість товару |

5.7 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Провівши аналіз конкуренції необхідно провести детальний аналіз умов конкуренції в галузі. Оцінити конкурентоспроможність послуг та рівень конкуренції на ринку (таблиця 5.8).

Таблиця 5.8. – Аналіз товарів – аналогів

| Параметр оцінки | Оцінка параметру | | |
|-----------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------|
| | 3 | 2 | 1 |
| Ціна / якість | Існують і займають значну долю ринку | Існують, тільки ввійшли на ринок | Відсутні |
| Загальний бал | 1 | | |

Ключ:

- 1 бал – низький рівень загрози із боку аналогів;
- 2 бали – середній рівень загрози із боку аналогів;
- 3 бали – низький рівень загрози із боку аналогів.

Можна зробити висновок, що у стартапу низький рівень загрози із боку аналогів.

Оцінка рівня внутрішньогалузевої конкуренції (таблиця 5.9).

Таблиця 5.9 – Оцінка рівня внутрішньогалузевої конкуренції

| Параметр оцінки | Оцінка параметру | | |
|-------------------|----------------------------------|---|------------------------------------|
| | 3 | 2 | 1 |
| Кількість гравців | Високий рівень насиченості ринку | Середній рівень насиченості ринку(3 – 10) | Невелика кількість гравців (1 – 3) |
| Темп росту ринку | Низький | Середній | Високий |

| | | | |
|--|--------------------------------------|---|------------------------------------|
| Рівень диференціації продукту на ринку | Стандартизований товар | Стандартизація по ключовим характеристикам, існують певні додаткові відмінності | Продукція значно відрізняється |
| Певна «границя» у збільшенні ціни | Можливості підвищувати ціну відсутні | Є можливість лише для покриття затрат | Завжди є можливість підвищити ціну |
| Загальний бал | 8 | | |

Ключ:

- 1–4 бали – низький рівень внутрішньогалузевої конкуренції;
- 5–8 балів – середній рівень внутрішньогалузевої конкуренції;
- 9–12 балів – високий рівень внутрішньогалузевої конкуренції.

Рівень конкуренції в галузі – середній.

Оцінка загрози появи нових гравців на ринку (таблиця 5.9).

Таблиця 5.10 – Оцінка загрози входу нових гравців

| Параметр оцінки | Оцінка параметра | | |
|---|------------------------|---|--|
| | 3 | 2 | 1 |
| Економія на масштабі при виробленні товару | Відсутня | Існує тільки в деяких гравців на ринку | Значна |
| Сильні марки з високим рівнем знань чи лояльності | Відсутні великі гравці | 2 – 3 великих гравця тримають майже 50% ринку | 2 – 3 великих гравця тримають більше 80% ринку |

| | | | |
|-----------------------------|--|---|---|
| Диференціація продукту | Низький рівень різноманіття товару | Існують мікро – ніші | Всі можливі ніші зайняті гравцями |
| Доступ до каналів розподілу | Доступ до каналів розподілу повністю відкритий | Доступ до каналів розподілу потребує помірних інвестицій | Доступ до каналів розподілу обмежений |
| Політика уряду | Немає обмежуючих актів з боку держави | Держава втручається в діяльність галузі на низькому рівні | Держава регламентує галузь і встановлює обмеження |
| Темп росту галузі | Високий і зростаючий | Сповільнюється | Стагнація або падіння |
| Підсумковий бал | 15 | | |

Ключ:

- 1–6 балів – низький рівень загрози входу нових гравців;
- 6–14 балів – середній рівень загрози входу нових гравців;
- 14–18 балів – високий рівень загрози входу нових гравців.

Можна зробити висновок, що ринок виробництва добрив являється відкритим, тому присутні досить висока конкуренція та загрози для входу нових гравців.

Оцінка загрози втрати споживачів (таблиця 5.11).

Таблиця 5.11 – Оцінка загрози втрати споживачів

| Параметр оцінки | Оцінка параметра | | |
|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---|
| | 3 | 2 | 1 |
| Для покупців з великим обсягом | Більше 80% продажів припадає на | Незначна частина клієнтів тримає | |

| | | | |
|---|---|---|--|
| продажів | декількох клієнтів | майже 50% продажів | розподілений між всіма клієнтами |
| Схильність до переключення на товари-субститути | Товар компанії не унікальний, існують повні аналоги | Товар компанії частково унікальний, є відмінні характеристики, важливі для клієнтів | Товар компанії повністю унікальний, аналогів немає |
| Чутливість до ціни | Покупець завжди буде переключатися на товар з низькою ціною | Покупець буде переключатися тільки в значній різниці в ціні | Покупець абсолютно не чутливий до ціни |
| Споживачі незадоволені якістю | Незадоволення ключовими характеристиками товару | Незадоволення вторинними характеристиками товару | Повне незадоволення якістю |
| Підсумковий бал | 10 | | |

Ключ:

- 1–4 бали – низький рівень загрози втрати споживачів;
- 5–8 балів – середній рівень загрози втрати споживачів;
- 9–12 балів – високий рівень загрози втрати споживачів.

Присутній середній рівень загрози втрат для споживачів.

Оцінка загрози для бізнесу з боку постачальників (таблиця 5.12).

Таблиця 5.12 – Оцінка загрози для бізнесу з боку постачальників

| Параметр оцінки | Оцінка параметру | |
|-----------------|------------------|---|
| | 2 | 1 |

| | | |
|---|---|---|
| Кількість постачальників | Незначна кількість постачальників | Широкий постачальників вибір |
| Обмеженість постачальників ресурсів | Обмеженість в об'ємах | Необмеженість в об'ємах |
| Вимоги переключення | Високі вимоги до переключення на інших постачальників | Низькі вимоги переключення на постачальників до інших |
| Пріоритетність напрямку для постачальника | Низька пріоритетність галузі для постачальника | Висока пріоритетність галузі для постачальника |
| Підсумковий бал | 3 | |

Ключ:

- 1–4 бали – низький рівень загрози впливу постачальників;
- 5–8 балів – середній рівень загрози впливу постачальників;
- 9–12 балів – високий рівень загрози впливу постачальників.

Можна зробити висновок, що стартап має гарний захист від загроз з боку постачальників, адже практично ніяк не впливають на його діяльність.

Останнім кроком є об'єднання всіх отриманих результатів за допомогою допоміжних таблиць, в єдину таблицю та проведення її аналізу. Саме ця таблиця є головною у процесі проведення внутрішнього управлінського аналізу за допомогою моделі Портера (таблиця 5.13).

Таблиця 5.13 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

| Параметр | Значення | Опис | Напрямок робіт |
|----------|----------|------|----------------|
|----------|----------|------|----------------|

| | | | |
|---|----------------|---|--|
| <p>Загроза з боку товарів – заміників</p> | <p>Низька</p> | <p>Компанія має досить сильний продукт, аналоги майже відсутні</p> | <p>Надалі підтримувати високу конкурентність та високі позиції на ринку, вироблять нові продукти</p> |
| <p>Загрози внутрішньо галузевої конкуренції</p> | <p>Висока</p> | <p>Ринок має високу конкурентність та перспективність</p> | <p>Проводити постійний аналіз товарів конкурентів, знижувати собіваріість при сталій якості</p> |
| <p>Загроза з боку нових гравців</p> | <p>Висока</p> | <p>Присутній високий ризик появи нових гравців на ринку, адже вхідні бар'єри низькі</p> | <p>Завжди підтримувати комунікації з клієнтами, моніторити появу нових конкурентів, інвестувати в маркетинг.</p> |
| <p>Загроза втрати поточних клієнтів</p> | <p>Середня</p> | <p>Для клієнтів важивим є питання ціни, вони хочуть платити менше за високу якість товару</p> | <p>Тримати якість товару на високому рівні, розробити пропозиції для різних груп клієнтів, знижувати собівартість продукту</p> |

| | | | |
|-------------------------------|---------|-----------------------------|---|
| Загроза впливу постачальників | Низький | Стабільне постачання товару | Вкладання угод з постачальниками на постійну роботу, наявність резервних постачальників |
|-------------------------------|---------|-----------------------------|---|

5.8 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Після виконання аналізу ніші, ризиків та постачальників, потрібно визначити та обґрунтувати фактори конкурентоспроможності. Поки проект знаходиться на стадії розробки, це зробити досить важко, тому можна дати попередню оцінку конкурентоспроможності (таблиця 5.14).

Таблиця 5.14 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

| № п/п | Фактор конкурентоспроможності | Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим) |
|-------|---|---|
| 1. | Абсолютна нова технологія контролю за якістю виготовленої продукції | Розроблена технологія передбачає вимірювання вологовмісту та температуру гранул на виході з гранулятора і за отриманими результатами корегує температураутриний режим в грануляторі |
| 2. | Висока ефективність гранулятора | Ефективна система управління |
| 3. | Низький відсоток браку кінцевого продукту | Контролю вологовмісту і температури гранул |

Як можна побачити з таблиці 5.14, фактори конкурентоспроможності суттєві та мають велике значення при запровадженні нової системи управління гранулятором. Нова технологія за контролем якості виготовленої продукції є головним есновою перевагою нашої системи.

5.9 SWOT – аналіз стартап – проекту

Таблиця 5.15 – SWOT – аналіз

| | <u>Можливості</u> | <u>Загрози</u> |
|---|--|---|
| | <p>1. Отримання держ. Замовленьна добрива</p> <p>2.Отримання сертифікатів якості та вихід на європейський ринок</p> <p>3. Підвищення доходів населення</p> <p>4.Підтримка комунікації зі клієнтами, посередниками та постачальниками</p> | <p>1. Політичні та економічні ризики</p> <p>2.Інфляція</p> <p>3. Зростання курсу долара може привести до зменшення попиту.</p> <p>4.Зміна законодавства</p> |
| <p><u>Сильні сторони</u></p> <p>1. Менеджмент витрат, пошук нових можливостей щодо їх зниження</p> <p>2.Інвестиційна привабливість</p> <p>3. Низький відсоток бракованого продукту</p> <p>4.Висока ефективність гранулятора</p> <p>5. Коректна цінова політика</p> | <p>Маємо 20 комбінацій у полі сила та можливості.</p> <p>У цьому напрямку стратегію будемо будувати наступним чином: необхідно постійно використовувати свої сильні сторони, для того, щоб скористатися можливостями зовнішнього середовища.</p> | <p>В полі сила і загрози маємо 16 комбінацій загроз і сильних сторін. Головним моментом, що дозволить уникнути нестабільного зовнішнього середовища, є сильний менеджмент і стратегічне ведення бізнесу власниками.</p> |

| <u>Слабкі сторони</u> | У полі слабкість та | У полі слабкість та |
|---|---|---|
| 1. Виробництво лише на території України 2. Слабка маркетингова політика 3. Відсутність інвесторів 4. Підвищення собівартості продукції через підвищення курсу долара та кіни на газ | можливості маємо 16 пар слабких сторін та можливостей. Наявні слабкості можна подолати за рахунок сильних сторін. | загрози існує 16 можливих комбінацій слабких сторін і загроз з боку навколишнього середовища. Старту необхідно позбавитись слабкостей, що заключається в локальності виробництва, низькому потоку інвестицій. Ці заходи необхідно провести щоб попередити наступні загрози з боку навколишнього середовища: зниження прибутку населення, економічні і політичні ризики діяльності. |

Провівши SWOT– аналіз, можна зробити висновок, що необхідно підсилювати сильні сторони за рахунок ринкових можливостей (таблиця 5.15).

5.10 Альтернативи ринкового впровадження стартап – проекту

На основі SWOT – аналізу було розроблено альтернативний перелік заходів, які допоможуть вивести стартап на ринок та оптимальний час їх реалізації на ринку з огляду на потенційних конкурентів.

Проаналізуємо визначені альтернативи впровадження на ринку з точки зору термінів та отримання ресурсів (таблиця 5.16).

Таблиця 5.16 – Альтернативи ринкового впровадження стартап – проекту

| № п/п | Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки | Ймовірність отримання ресурсів | Строки реалізації |
|-------|--|--------------------------------|-------------------|
| 1 | Зменшення ринкових загроз за допомогою сильних сторін стартапу | Середня | 2 рік |
| 2 | Зменшення впливу слабких сторін стартапу за допомогою можливості ринку | Висока | 1 рік |
| 3 | Стратегія виходу з ринку | Низька | |

5.11 Вибір цільових груп потенційних споживачів

Перший крок у розробці ринкової стратегії передбачає визначення стратегії входу на ринок: опис цільових груп потенційних споживачів (таблиця 5.17).

Таблиця 5.17 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

| Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів | Готовність споживачів сприйняти продукт | Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту) | Інтенсивність конкуренції в сегменті | Простота входу у сегмент |
|--|---|---|--------------------------------------|--------------------------|
| | | | | |

| | | | | |
|-----|---|--|--------|--|
| АПК | Визначатиметь готовністю підприємств виділять додаткові кошти на впровадженням результатів наукових досліджень | Залежать від темтів та рівня розвитку економіки в цілому | Висока | Низькі бар'єри входу на ринок |
|-----|---|--|--------|--|

5.12 Визначення базової стратегії розвитку

Провівши аналіз потенційних груп клієнтів (сегментів) обрано цільову аудиторію, яким буде пропонуватися нова технологію виробництва мінеральних добрив у вигляді гранул та визначено стратегію входу та охоплення ринку: стратегія диференційованого маркетингу, так як ми працюємо із конкретним сегментом клієнтів.

Щоб зрозуміти, яким саме чином почати роботу в обраному сегменті ринку, потрібно сформувані базову стратегію розвитку (таблиця 5.18).

Таблиця 5.18 – Визначення базової стратегії розвитку

| № п/п | Обрана альтернатива розвитку проекту | Стратегія охоплення ринку | Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи | Базова стратегія розвитку |
|----------|---|---------------------------------|---|---------------------------------|
|----------|---|---------------------------------|---|---------------------------------|

| | | | | |
|---|--|----------------------------|---|---|
| 1 | Підсилення сильних сторін стартапу за рахунок можливостей на ринку | Диференційований маркетинг | Висока якість продукту, постійна комунікація з клієнтом, низький відсоток браку | Стратегія диференційованої маркетингової політики |
|---|--|----------------------------|---|---|

5.13 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Таблиця 5.19 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

| № п/п | Чи є даний проект першим на ринку у своїй ніші? | Чи буде компанія шукати нових споживачів або забирати існуючих у конкурентів? | Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента і які? | Стратегія конкурентної поведінки |
|-------|---|---|--|----------------------------------|
| 1 | Ні | Так | Буде створюватися повністю унікальний продукт | Зайняття конкурентної ніші |

5.14 Розроблення маркетингової програми стартап – проекту

Таблиця 5.20 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

| № п/п | Потреба | Вигода що пропонується продуктом | Ключові переваги перед конкурентами |
|-------|--|---|---|
| 1 | Високий попит на якісні добрива у зв'язку із скороченням імпорту із-за кордону | Якісні добрива з низьким вологовмістом у гранулах | Головна перевага – низький відсоток браку порівняно з конкурентами. |

5.15 Концепція маркетингових комунікацій

Таблиця 5.21 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

| № п/п | Специфіка поведінки цільових клієнтів | Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти | Ключові позиції, обрані для позиціонування |
|----------|--|--|--|
| 1 | Використання вузьконаправлений комунікацій з клієнтами. | Агро-виставки, різноманітні семінари, каталоги, спеціалізовані видання, журнали, веб-сайт | Спеціалізовані виставки |

ВИСНОВКИ

При виконанні магістерської дисертації було розглянуто процес грануляції та зневоднення у грануляторі із псевдозрідженим шаром. Роботу присвячено роз'язанню задачі проектування та управління температурним режимом гранул для забезпечення виробництва якісної грануляту із низьким вологовмістом. У науковій роботі виконано дослідження процесу грануляції та зневоднення, виділено основні фактори, які впливають на виготовлення якісних добрив, а саме: температура гріючого повітря, температура гранул, вологовміст гранул, в'язкість сполучної речовини та її концентрація.

Проведено огляд та аналіз існуючих математичних моделей таких як модель балансу популяції, трьохступінчата математична модель, трьохфазна математична модель, двокомпонентна математична модель та методів їх розв'язання. В усіх вищенаведених моделях велика увага приділялась властивостям сполучної речовини та температурному режиму та вологовмісту. Тому саме процес зневоднення є ключовим при розробці математичної моделі та системи управління гранулятором із псевдозрідженим шаром.

Розроблено математичну модель гранулятора, яка описує процес зневоднення та грануляції. За допомогою створеної програмного додатку на мові Python та методу Рунге – Кутти четвертого порядку для розв'язання дивергенціальних рівнянь, досліджено поведінку математичної моделі на основі реальних даних, що використовуються на виробництві. Отримані результати адекватно відображають процес зневоднення у грануляторі із псевдозрідженим шаром.

На основі розробленої математичної моделі за допомогою програмного пакету Matlab отримано передавальну функцію гранулятора, розроблено системи керування на основі ПІ та ПІД-регуляторів, яка повинна виводити та підтримувати температуру гранул на заданому рівні, визначеному із дослідження математичної моделі та проведено їх порівняння, для визначення системи, що краще справляється з поставленим завданням.

Система управління на основі ПІ–регулятора виводить температуру гранул із 360 К до 378 К за 213 секунд, має перерегулювання 10%. Система управління на основі ПД–регулятора виконує поставлене завдання за 173 секунди має значно менше перерегулювання 3,5%. Тому систему управління з ПД–регулятором краще використовувати на виробництві, тому що вона дозволяє зменшити витрати газу які використовуються під час процесу зневоднення за рахунок скорочення тривалості процесу зумовленого швидким досягненням зідіної температури гранул.

Розроблено стартап-проект, в якому обраховується доцільність та економічна вигода використання розробленої системи управління на виробництві.

За результатами виконання магістерської дисертації написано та опубліковано 2 тезисні доповіді на міжнародних конференціях.

Всі поставлені завдання в магістерській дисертації виконано.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Корнієнко Б.Я. Інформаційні технології оптимального управління виробництвом мінеральних добрив : монографія / Б.Я. Корнієнко. – К.: Вид – во Аграр Медіа Груп, 2014. – 288 с.
2. Корниенко Б.Я. Математическая модель процесса гранулирования в псевдооживленном слое с использованием теории фрактальных множеств / В.В. Новиков, Б.Я. Корниенко, А.А. Сомлев // Науковий журнал «Вісник Національного авіаційного університету». – К.: НАУ, 2008. – № 3. – С. 196 – 200.
3. Корнієнко Б.Я. Особливості моделювання процесів переносу у дисперсних системах / Б.Я. Корнієнко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2011. – № 2(8). – С. 5–9.
4. Корнієнко Б.Я. Система керування процесом зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі / Б.Я. Корнієнко // Хімічна промисловість України. – 2011. – № 6. – С. 63–68.
5. Корнієнко Б.Я. Динаміка процесів зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі / Б.Я. Корнієнко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2012. – № 1(9). – С. 15–19.
6. Корнієнко Б.Я. Двохфазна модель процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі / Б.Я. Корнієнко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2012. – № 2(10). – С. 31–35.
7. Корнієнко Б.Я. Математичне моделювання динаміки процесів переносу при зневодненні та гранулюванні у псевдозрідженому шарі / Б.Я. Корнієнко // Науковий журнал «Вісник Національного авіаційного університету». – 2012. – № 4(53). – С. 84 – 90.

8. Korniyenko B.Y. Modeling of transport processes in disperse systems / В. Korniyenko // The Advanced Science Journal. – 2013. – issue 1. – P. 7–10.
9. Корнієнко Б.Я. Мінеральні добрива. Двохфазна модель утворення в грануляторі із псевдозрідженим шаром / Б.Я. Корнієнко // Хімічна промисловість України. – 2013. – № 1. – С. 39 – 43.
10. Korniyenko B.Y. The two phase model of formation of mineral fertilizers in the fluidized-bed granulator / В. Korniyenko // The Advanced Science Journal. – 2013. – Issue 4. – P. 41 – 44.
11. Корнієнко Б.Я. Гранулювання у псевдозрідженому шарі. Дослідження детермінованого хаосу процесу / Б.Я. Корнієнко, Л.Р. Ладієва, О.В. Снігур // Хімічна промисловість України. – 2013. – № 2. – С. 20 –23.
12. Korniyenko B.Y. Research modes of a fluidized bed granulator / В. Korniyenko // The Advanced Science Journal. – 2013. – Issue 5. – P. 12 – 15.
13. Korniyenko B.Y. Open systems interconnection model investigation from the viewpoint of information security / В. Korniyenko, O. Yudin, E. Novizkij // The Advanced Science Journal. – 2013. – Issue 8. – P. 53 – 56.
14. Корнієнко Б.Я. Мінеральні добрива. Оптимізація процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі / Б.Я. Корнієнко // Хімічна промисловість України. – 2013. – № 4. – С. 69–73.
15. Korniyenko B.Y. Static and dynamic characteristics of transport processes in disperse systems / В. Korniyenko // Науковий журнал «Наукоємні технології». – 2013. – № 2 (18). – С. 166 – 170.
16. Корнієнко Б.Я. Мінеральні добрива. Статична оптимізація процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі / Б.Я. Корнієнко // Хімічна промисловість України. – 2013. – № 5. – С. 36– 40.
17. Корнієнко Б.Я. Ідентифікація процесу гранулювання мінеральних добрив у апараті з псевдозрідженим шаром / Б.Я. Корнієнко // Науковий журнал «Наукоємні технології». – 2013. – № 3 (19). – С. 280 – 284.
18. 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.

19. Korniyenko B.Y., Borzenkova S.V., Ladieva L.R. Research of three – phase mathematical model of dehydration and granulation process in the fluidized bed / B.Y. Korniyenko, S.V. Borzenkova, L.R. Ladieva // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences Volume 14, Issue 12, June 2019, Pages 2329 – 2332.
20. Kornienko Y.M., Liubeka A.M., Sachok R.V., Korniyenko B.Y. Modeling of heat exchangement in fluidized bed with mechanical liquid distribution / Y.M. Kornienko, A.M. Liubeka, R.V. Sachok, B.Y. Korniyenko// ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences Volume 14, Issue 12, June 2019, Pages 2203 – 2210.
21. Zhulynskyi A.A., Ladieva L.R., Korniyenko B.Y. Parametric identification of the process of contact membrane distillation/ A.A. Zhulynskyi, L.R. Ladieva, B.Y. Korniyenko // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences Volume 14, Issue 17, September 2019, Pages 3108 – 3112.
22. Korniyenko B.Y. The two – phase mathematical model of dehydration and granulation in a fluidized bed. Contemporary Engineering Sciences, Vol. 10, 2017, no. 11, 535 – 544 <https://doi.org/10.12988/ces.2017.7648>
23. Корнієнко Б.Я. Дослідження математичних моделей процесів зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі / Б.Я. Корнієнко // Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI'2017): Збірка наукових праць міжнародної наукової конференції 22–26 травня 2017 Херсон, Україна, С. 71 – 73.
24. Корнієнко Б.Я. Аналіз математичних моделей процесів зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі / Б.Я. Корнієнко // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки: зб. наук. праць / Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова Національної академії наук України, Кам'янець – Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2017. – Вип. 15, С. 86 – 91.
25. Korniyenko B. The classification of information technologies and control systems / B. Korniyenko // International scientific journal. – 2016. –№ 2. – P. 78 – 81.

26. Струменево-пульсаційний режим псевдозрідження. [Електронний ресурс]: монографія для студентів, які навчаються за напрямком «Машинобудування» спеціальність «Обліднання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів»/ НТУУ «КПІ»; уклад. Я. М. Корнієнко., М. П. Мельник, О.В. Мартинюк. – Київ: НТУУ «КПІ», 2013. –235.
27. Дэвидсон Дж. Псевдосжижение / Дж. Дэвидсон, Д. Харрисон. – М. : Химия, 1973 – 725 с.