

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

Факультет інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра інформаційних систем та технологій

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Олександр РОЛІК

«___» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Інтегровані інформаційні системи»
спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології»
на тему: «Система управління виробництвом мінеральних добрив»

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи ІА-92

Нікітюк Максим Вікторович

Керівник:

Професор, д.т.н., професор,

Корнієнко Богдан Ярославович

Рецензент:

Доцент кафедри ТПЗА ІХФ, к.т.н., доцент,

Ладієва Леся Ростиславівна

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2023 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет інформатики та обчислювальної техніки
Кафедра інформаційних систем та технологій

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 126 «Інформаційні системи та технології»

Освітньо-професійна програма «Інтегровані інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олександр РОЛІК

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Нікітюку Максиму Вікторовичу

1. Тема проєкту «Система управління виробництвом мінеральних добрив», керівник проєкту Корнієнко Богдан Ярославович, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від «31» травня 2023 р. № 2101-с

2. Термін подання студентом проєкту: 12 червня 2023 року

3. Вихідні дані до проєкту:

Система управління виробництвом мінеральних добрив, дані про технологічні процеси, а саме зневоднення, гранулювання, сушіння, сумішування та інші процеси, які впливають на якість та властивості добрив. Умови виробництва, такі як температура, тиск, вологість. Інформація про використовувані регулятори.

4. Зміст пояснювальної записки:

Аналіз сучасного стану проблеми, методів та засобів для вирішення завдання проєкту, обґрунтування їх оптимальності, методики та результати розрахунків, проєктування, опис розроблених систем.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо)

Діаграма використання, діаграма діяльності, схема структурна, схема функціональна.

6. Дата видачі завдання 13 квітня 2023 року.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Затвердження теми дипломного проєкту	17.04.2023	
2	Аналіз предметної області	21.04.2023	
3	Аналіз існуючих рішень та аналогів	28.04.2023	
4	Створення основних та додаткових вимог до системи	05.05.2023	
5	Розробка системи	19.05.2023	
6	Розробка нечіткого адаптивного регулятора	31.05.2023	
7	Оформлення дипломного проєкту	12.06.2023	
8	Передзахист дипломного проєкту	16.06.2023	
9	Захист дипломного проєкту	20.06.2023	

Студент

Максим НІКІТЮК

Керівник

Богдан КОРНІЄНКО

Анотація

Нікітюк М.В. Система управління виробництвом мінеральних добрив. КІП ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2023.

Проект містить 61 с. тексту, 12 рисунків, 4 таблиці, посилання на 18 літературних джерел та 4 конструкторські документи.

Ключові слова: мінеральні добрива, математичні моделі, зневоднення та гранулювання, псевдозрідений шар, двохфазний підхід, еталонна математична модель, нечіткий адаптивний регулятор.

Об'єктом дослідження є організація й автоматизація системи виробництва мінеральних добрив.

Мета розробки – удосконалення системи управління виробництвом мінеральних добрив, завдяки розробці нечіткого адаптивного регулятора.

У дипломному проєкті розроблено систему управління виробництвом мінеральних добрив. Проведено аналіз технологій, які використовуються при розробці таких систем. Також були розглянуті інформаційні технології у виробництві мінеральних добрив. Були проаналізовані математичні моделі виробництва мінеральних добрив, та розроблено еталонну математичну модель.

Значну увагу було приділено розробці нечіткого адаптивного регулятора. Було протестовано систему управління з розробленим регулятором, та зроблені висновки використання такої системи.

Summary

Nikitiuk M.V. Management system for the production of mineral fertilizers. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, 2023.

The project contains 61 pages. text, 12 images, 4 tables references to 18 literary sources and 4 schematic documents.

Key words: mineral fertilizers, mathematical models, dehydration and granulation, fluidized bed, two-phase approach, reference mathematical model, fuzzy adaptive controller.

The object of the study is the organization and automation of the mineral fertilizer production system.

The purpose of the development is to improve the management system for the production of mineral fertilizers, thanks to the development of a fuzzy adaptive regulator.

The diploma project developed a management system for the production of mineral fertilizers. An analysis of the technologies used in the development of such systems was carried out. Information technologies in the production of mineral fertilizers were also considered. Mathematical models of mineral fertilizer production were analyzed, and a reference mathematical model was developed.

Considerable attention was paid to the development of a fuzzy adaptive controller. The control system with the developed regulator was tested, and conclusions were drawn about the use of such a system.

Номер рядка	Формат	Позначення	Найменування	Кільк. аркушів	Номер екзем.	Примітка
1			Документація загальна			
2						
3			Знову розроблена			
4						
5	A4	IA92.140БАК.004 ПЗ	Пояснювальна записка	61		
6	A3	IA92.140БАК.004 Д1	Система управління	1		
7			виробництвом мінеральних			
8			добрив. Діаграма			
9			Використання			
10	A3	IA92.140БАК.004 Д2	Система управління	1		
11			виробництвом мінеральних			
12			добрив. Діаграма			
13			Діяльності			
14	A3	IA92.140БАК.004 Э1	Система управління	1		
15			виробництвом мінеральних			
16			добрив. Схема			
17			Структурна			
18	A3	IA92.140БАК.004 Э2	Система управління	1		
19			виробництвом мінеральних			
20			добрив. Схема			
21			Функціональна			
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						

					IA92.140БАК.004 ТП					
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата						
Розроб.		Нікітюк М.В.			Система управління виробництвом мінеральних добрив. Відомість проєкту		Літ.	Аркуш	Аркушів	
Керівн.		Корнієнко Б.Я.					Т		1	1
							КПІ ім. Ігоря Сікорського			
Затв.							Група ІА-92			

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Система управління виробництвом
мінеральних добрив»

Київ – 2023 року

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1 ОГЛЯД СКЛАДОВИХ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ	5
1.1 Аналіз та огляд технологій при виробництві мінеральних добрив	9
1.2 Інформаційні технології у виробництві мінеральних добрив.	14
1.3 Аналіз математичних моделей виробництва мінеральних добрив.....	17
1.4 Системи управління при виробництві мінеральних добрив	18
Висновки	25
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНЕВОДНЕННЯ І ГРАНУЛЮВАННЯ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ	27
2.1 Метод математичного моделювання на основі двохфазного підходу. ..	28
2.2 Еталонна математична модель процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі, та її особливості.....	33
2.3 Розробка математичної моделі	40
Висновки	43
3 СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЦТВА МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ, З НЕЧІТКИМ АДАПТИВНИМ РЕГУЛЯТОРОМ.....	45
3.1 Нечіткий адаптивний регулятор.....	46
3.2 Система управління з нечітким адаптивним регулятором	49
3.3 Розробка нечіткого адаптивного регулятора	50
Висновки	54
ВИСНОВКИ.....	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	58

					ІА92.140БАК.004 ПЗ							
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис		Система управління виробництвом мінеральних добрив. Пояснювальна записка				Літ.	Арк.	Аркушів	
Розробив		Нікітюк М.В.							Т		2	61
Перевірив		Корнієнко Б.Я.										
Затв.									КПІ ім. Ігоря Сікорського Група ІА-92			

ВСТУП

Використання інформаційних технологій в управлінні технологічними процесами виробництва мінеральних добрив може принести значні переваги в термінах ефективності, точності та автоматизації. Деякі з використовуваних інформаційних технологій у цій галузі включають:

Автоматизовані системи управління, які є ключовим елементом виробничих підприємств, включаючи виробництво мінеральних добрив. Вони використовуються для контролю, моніторингу та керування технологічними процесами. АСУ дозволяють збирати дані з датчиків та обладнання, аналізувати їх і приймати рішення щодо оптимальних параметрів роботи системи. Це допомагає забезпечити стабільність процесів, підвищити якість продукції та знизити витрати.

Системи моніторингу та контролю: Інформаційні технології включають системи моніторингу та контролю параметрів виробництва, таких як температура, вологість, рівень реагентів тощо. Дані можуть бути зібрані за допомогою датчиків та передані до централізованої системи, де вони аналізуються та використовуються для прийняття рішень щодо оптимального управління процесами.

Моделювання та оптимізація: Інформаційні технології дозволяють проводити математичне моделювання та оптимізацію технологічних процесів виробництва мінеральних добрив. Це дозволяє прогнозувати поведінку системи, виявляти оптимальні параметри та вдосконалювати процеси з використанням комп'ютерних алгоритмів.

Системи планування та управління виробництвом: Інформаційні технології включають системи планування та управління виробництвом, які допомагають покращити ефективність та координацію різних етапів виробництва мінеральних добрив. Вони дозволяють планувати використання ресурсів, розподіляти завдання та координувати роботу персоналу, що сприяє зниженню часу і витрат на виробництво.

Використання інформаційних технологій в управлінні технологічними процесами виробництва мінеральних добрив може покращити якість продукції,

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						3
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

знизити витрати, забезпечити стабільність та ефективність виробництва. Це допомагає підприємствам досягати кращих результатів та конкурентних переваг на ринку.

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД СКЛАДОВИХ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ

Виробництво мінеральних добрив включає в себе використання різноманітних технологій, математичних моделей, систем управління та інформаційних технологій. Давайте розглянемо кожен з цих аспектів більш детально:

Технології:

Фізико-хімічні процеси: Виробництво мінеральних добрив вимагає проведення фізико-хімічних процесів, таких як синтез хімічних сполук, конвертація сировини та формування кінцевого продукту. Для цього використовуються спеціалізовані реактори, каталізатори, теплообмінники та інші пристрої.

Обробка сировини: Перед використанням сировини (наприклад, фосфатної руди) її необхідно піддати обробці, такій як подрібнення, сортування, промивання тощо. Ці процеси забезпечують отримання потрібних фракцій та якості сировини для подальшого виробництва добрив.

Гранулювання та упаковування: Мінеральні добрива зазвичай гранулюються (утворення гранул з сипкого матеріалу) та упаковуються у відповідну упаковку для подальшого зберігання та транспортування.

Математичні моделі:

Моделювання процесів: Математичні моделі дозволяють прогнозувати та оптимізувати різні етапи виробництва мінеральних добрив. Наприклад, моделювання фізико-хімічних реакцій допомагає визначити оптимальні умови для синтезу продукту, а моделювання теплових процесів дозволяє раціонально використовувати енергію.

Прогнозування властивостей: Математичні моделі також можуть використовуватись для прогнозування фізичних та хімічних властивостей мінеральних добрив на основі складу сировини та умов виробництва. Це допомагає контролювати якість та впливати на властивості кінцевого продукту.

Системи управління:

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Автоматизація процесів: У виробництві мінеральних добрив широко застосовуються системи автоматизації та керування, які дозволяють контролювати та регулювати різні етапи процесу. Це можуть бути системи збору та аналізу даних, системи контролю параметрів, системи автоматичного дозування реагентів тощо. Автоматизація допомагає підвищити ефективність та точність виробництва, а також зменшити ризик помилок та аварій.

Моніторинг та управління якістю: Системи управління дозволяють вести моніторинг параметрів та властивостей мінеральних добрив на різних етапах виробництва. Це допомагає забезпечити відповідність продукції вимогам якості та вчасно виявляти та усувати відхилення.

Інформаційні технології:

Системи управління виробництвом: Виробництво мінеральних добрив може включати в себе використання систем управління виробництвом (Manufacturing Execution Systems - MES), які дозволяють координувати та оптимізувати всі процеси, ресурси та персонал на підприємстві.

Інформаційні системи: Для збору, обробки та аналізу даних використовуються різноманітні інформаційні системи. Наприклад, системи управління виробництвом, системи управління якістю, системи моніторингу та діагностики. Ці системи допомагають в управлінні процесами та прийнятті рішень на основі наявних даних.

Всі ці технології, математичні моделі, системи управління та інформаційні технології сприяють підвищенню ефективності, якості та безпеки виробництва мінеральних добрив. Вони дозволяють оптимізувати процеси, забезпечувати стабільну якість продукції та знижувати вплив на навколишнє середовище.

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

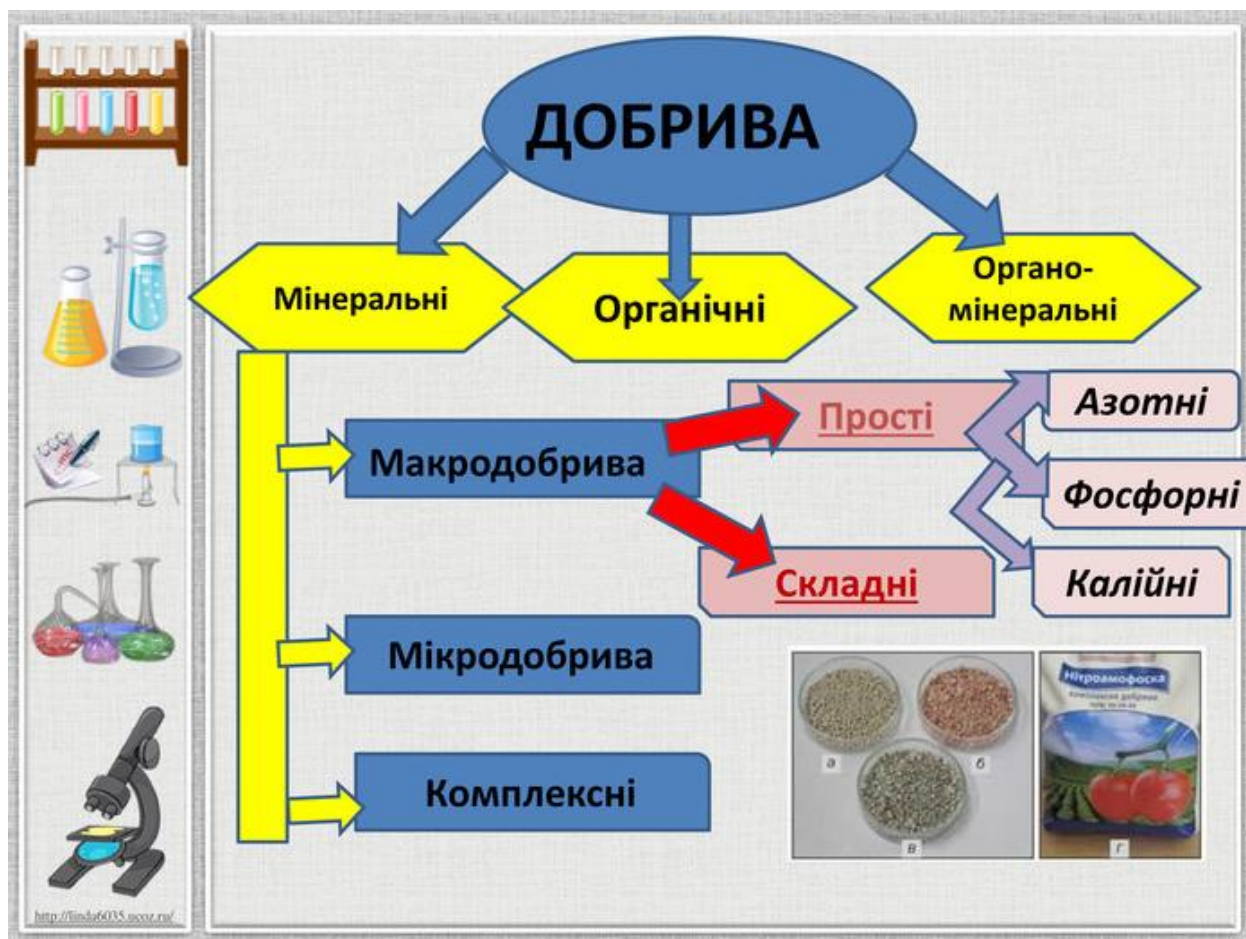


Рисунок 1.1 — Класифікація мінеральних добрив за походженням виробництва

Таблиця 1.1 — Найпоширеніші мікродобрива

Елементи	Назва добрива	Вміст діючої речовини, %
Бор	Борна кислота	17
	Натрій борат (бура)	11
Молібден	Молібденова кислота	53
	Амоній молібдат	52
	Амоній-натрій молібдат	36
Мідь	Мідний купорос	24
Марганець	Манган сульфат	21-24
	Марганцевокислий калій	35
Кобальт	Кобальт сульфат	18-20

Ферум	Ферум сульфат (залізний купорос)	21-24
-------	----------------------------------	-------

Таблиця 1.2 — Найважливіші комплексні добрива

Назва добрив	Головні компоненти	Вміст основних діючих речовин
Суперфосфат амонізований	$\text{CaHPO}_4 + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + \text{CaSO}_4$	1,5—3 % N
Амофос	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	19—20 % P_2O_5
Амофоска	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + \text{KNO}_3 + \text{NH}_4\text{Cl}$	21—25 % N, 20—25 % P_2O_5
Диамофос	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	11—14 % N
Нітроамофос	$\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	46—55 % P_2O_5
Нітроамофоска, азофоска	$\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + \text{KNO}_3 + \text{NH}_4\text{Cl}$	13,5% N, 46,5% K_2O
Калій нітрат	KNO_3	18% N, 46 P_2O_5
Карбоамофоска	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 + \text{KNO}_3 + \text{NH}_4\text{Cl}$	8-12%N, 10-24%
Нітрофоски	$\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{CaHPO}_4 + \text{KNO}_3 + \text{NH}_4\text{Cl} + (\text{або } (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4)$	15—24% K_2O
	Або $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	17—18,5 % N, P_2O_5 і K_2O
	Або CaCO_3	По 18—20 % N, P_2O_5 і K_2O
Магній амонійфосфат	$\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	11—20% N, 8—16% P_2O_5
Амоній метафосфат	$(\text{NH}_4\text{PO}_3)_n$	10—21 % K_2O

Амоній поліфосфат	$(\text{NH}_4)_5\text{O}_{10} + (\text{NH}_4)_4\text{P}_2\text{O}_7$ $+ (\text{NH}_4)_3\text{HP}_2\text{O}_7 + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	35%P ₂ O ₅ , 18% MgO, 17% N, 80% P ₂ O ₅ 12- 25% N, 53-61 % P ₂ O ₅
----------------------	---	---

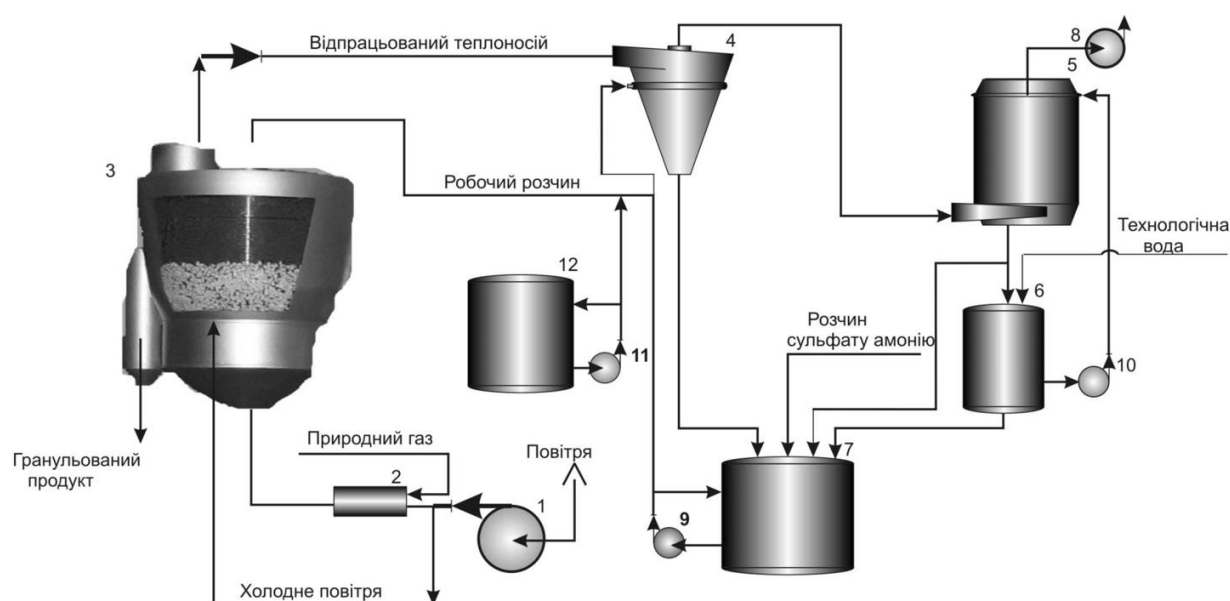


Рисунок 1.2 — Установка для отримання комплексних гранульованих
гуманово-мінеральних добрив

1.1 Аналіз та огляд технологій при виробництві мінеральних добрив

Аналіз та огляд технологій при виробництві мінеральних добрив можна розглянути з різних аспектів, таких як процес виробництва, типи добрив, використані технології та інші фактори. Давайτε розглянемо кілька ключових аспектів.

Типи мінеральних добрив: Як було зазначено вище, мінеральні добрива можна класифікувати за вмістом основних поживних речовин - азоту (N), фосфору (P) та калію (K). Найпоширеніші типи добрив включають азотні, фосфатні та калійні

добрива. Крім того, існують комплексні добрива, які містять комбінацію цих основних елементів.

Процес виробництва: Виробництво мінеральних добрив включає кілька основних етапів. Першим кроком є видобуток або добування сировинних матеріалів, таких як фосфатні руди, калійна сіль або азотні гази. Наступним етапом є подрібнення та обробка сировини для отримання необхідних поживних речовин. Потім проводяться процеси синтезу та змішування, щоб отримати кінцеві форми мінеральних добрив, такі як гранули або порошки.

Технології виробництва: Виробництво мінеральних добрив використовує різні технології для покращення якості та ефективності продукції. Наприклад, для забезпечення рівномірного розподілу поживних речовин у добриві можуть використовуватися методи грануляції або компресії. Технології контролю за якістю включають використання спеціальних аналітичних приладів для вимірювання концентрації поживних речовин у добривах.

Інновації у виробництві: За останні роки у виробництві мінеральних добрив було введено кілька інноваційних технологій. Наприклад, були розроблені нові методи вирощування кристалів, що дозволяють отримувати більш однорідні та стабільні гранули добрив. Також використовуються нові методи реакційного синтезу, які покращують ефективність виробництва та зменшують витрати енергії.

Екологічні аспекти: Виробництво мінеральних добрив може мати значний вплив на навколишнє середовище. Однак, сучасні технології намагаються зменшити негативний вплив на екологію. Наприклад, використання спеціальних систем очищення повітря та води допомагає зменшити викиди шкідливих речовин у процесі виробництва.

Важливо враховувати, що технології при виробництві мінеральних добрив постійно розвиваються, і нові інновації можуть з'являтися у майбутньому. Аналіз та огляд технологій повинен враховувати найновіші досягнення та тренди у цій галузі.

Для прикладу ми розглянемо способи та процес виробництва кальцієвої селітри. Кальцієва селітра ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) є одним з популярних мінеральних добрив, яке

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

містить кальцій і нітрати. Існує кілька способів виробництва кальцієвої селітри, серед яких найпоширеніші ми розглянемо найпоширеніші.

Реакція кальцію з азотною кислотою: У цьому методі кальцій (Ca) реагує з азотною кислотою (HNO₃), утворюючи кальцієву селітру (Ca(NO₃)₂) та воду (H₂O). Даний метод можна провести шляхом наступних кроків:

— Підготовка розчину нітратної кислоти: Нітратну кислоту розчиняють у воді, створюючи розчин з необхідною концентрацією. Для цього можна використовувати технології розведення або розчинення нітратної кислоти в спеціальних реакторах.

— Підготовка розчину вапняку: Вапняк (CaCO₃) також розчиняють у воді для отримання розчину вапняку. Це можна зробити шляхом реакції вапняку з кислотою (наприклад, соляною кислотою) або застосування інших методів розчинення.

— Змішування розчинів: Розчин нітратної кислоти та розчин вапняку змішуються разом у певних пропорціях. Це може відбуватися в спеціальних змішувальних апаратах або реакторах.

— Нейтралізація: Після змішування розчинів відбувається реакція нейтралізації між нітратною кислотою та вапняком. У результаті цієї реакції утворюється кальцієва селітра та вода. Цей процес може бути екзотермічним, тому необхідно контролювати температуру.

— Відокремлення кристалів: Отриману суміш реакційної маси розподіляють у спеціальній апаратурі, де здійснюється відокремлення кристалів кальцієвої селітри. Це може включати фільтрацію, осадження або випаровування розчину для отримання кристалів.

— Сушіння та очищення: Отримані кристали кальцієвої селітри сушать для видалення надлишкової вологості. Також можуть застосовуватися додаткові процеси очищення для отримання більш чистої продукції.

— Упаковка та зберігання: Остаточні кристали кальцієвої селітри упаковують у відповідну тару (наприклад, мішки, контейнери) для зберігання та транспортування до місць використання.

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

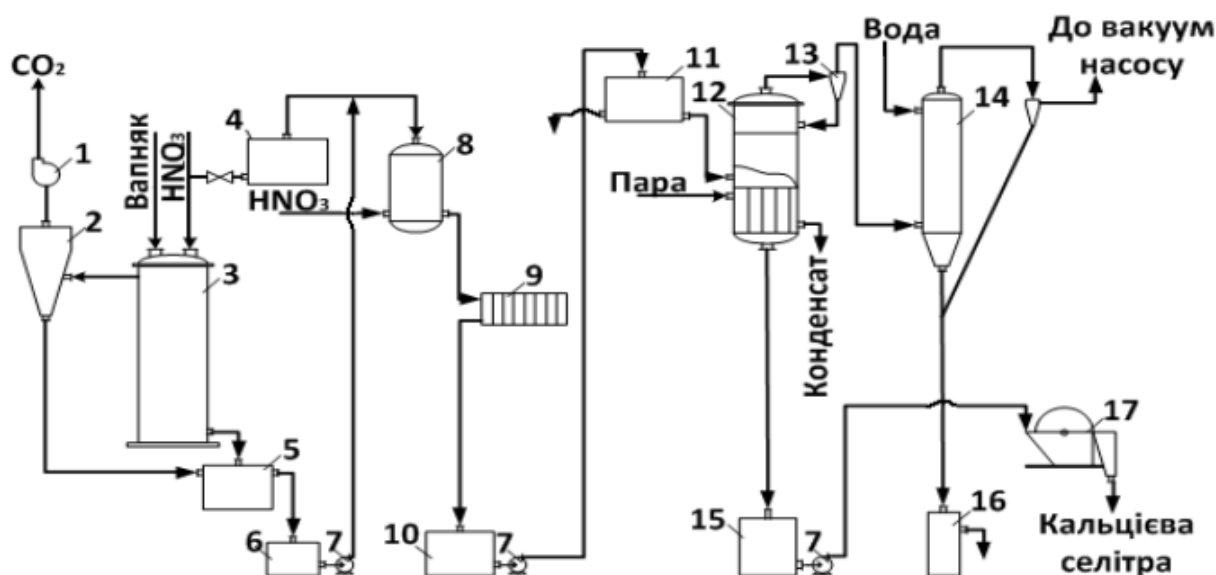


Рисунок 1.3 — Схема виробництва кальцієвої селітри з вапняку і нітратної кислоти: 1 — вентилятор; 2 — брызковловлювач; 3 — реакційна вежа; 4 — напірний бак для кислого розчину кальцієвої селітри; 5, 6 — відстійники кислого розчину кальцієвої селітри; 7 — відцентрові насоси; 8 — донейтралізатор; 9 — фільтрпрес; 10 — збірник відфільтрованого розчину; 11 — напірний бак; 12 — випарний апарат; 13 — вловлювач; 14 — барометричний конденсатор; 15 — збірник плаву кальцієвої селітри; 16 — барометричний ящик; 17 — охолоджуючі вальці

Виробництво кальцієвої селітри є складним процесом, який вимагає контролю температури, концентрації реагентів та інших умов. Отримана кальцієва селітра може бути подрібнена або залишена у вигляді кристалів в залежності від вимог виробництва та кінцевого застосування.

Наступний метод, який ми розглянемо, виробництво кальцієвої селітри способом лужної абсорбції нітрозних газів.

Виробництво кальцієвої селітри ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) способом лужної абсорбції нітрозних газів включає наступні кроки:

— Підготовка розчину лугу: У першому кроці підготовлюють розчин лугу, який використовується для абсорбції нітрозних газів. Зазвичай використовують натрій або кальцій гідроксид для приготування розчину лугу.

— Абсорбція нітрозних газів: Розчин лугу піддають процесу абсорбції нітрозних

газів (зазвичай оксиду азоту NO_x) з використанням спеціального обладнання, наприклад, абсорбера. Газова фаза, що містить нітрозні гази, контактує з розчином лугу, і нітрозні гази поглинаються лугом.

— Утворення кальцієвої селітри: Під час абсорбції нітрозних газів в розчині лугу утворюється кальцієва селітра ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$). Нітрозні гази реагують з лугом, утворюючи селітру та воду. Цей процес може бути екзотермічним, тому необхідно контролювати температуру.

— Очищення та відділення: Отриманий розчин кальцієвої селітри піддають процесу очищення, щоб видалити домішки та незрозумілі речовини. Потім розчин піддається процесу відділення, наприклад, фільтрації або випаровування, щоб отримати чисту кристалічну кальцієву селітру.

— Сушіння та упаковка: Отримані кристали кальцієвої селітри сушать для видалення надлишкової вологості. Після сушіння продукцію упаковують у відповідну тару, наприклад, мішки чи контейнери, для зберігання та транспортування.

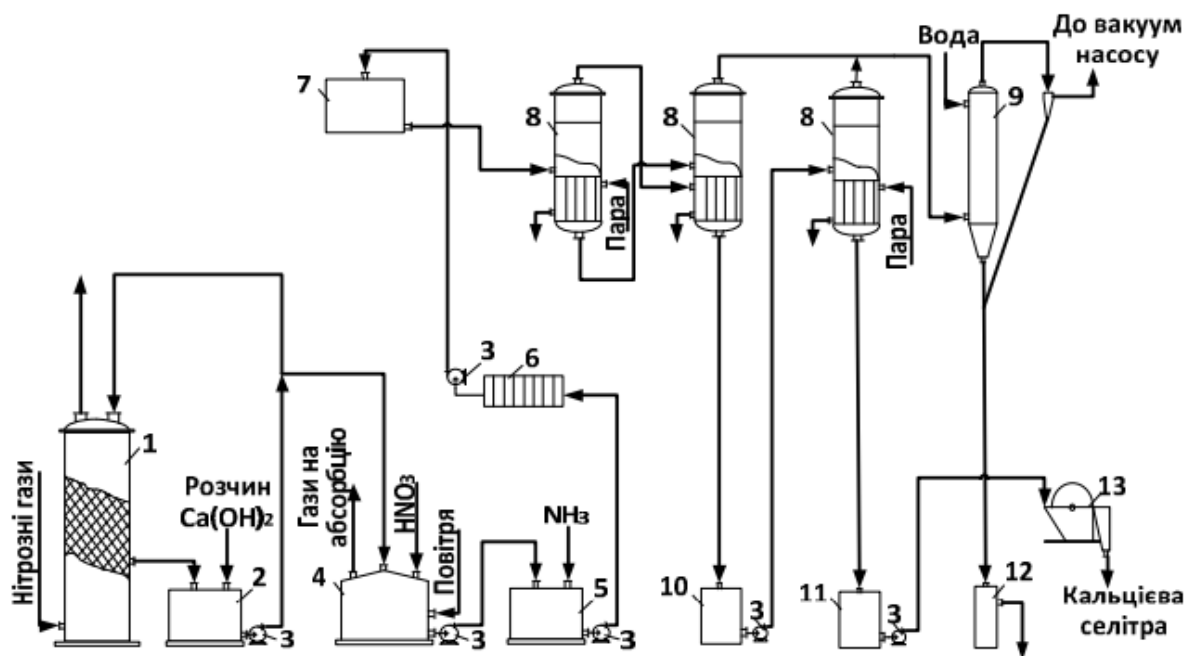


Рисунок 1.4 — Схема виробництва кальцієвої селітри методом лужної абсорбції нітрозних газів: 1 — абсорбційна вежа; 2 — збірник нітритнітратного лугу; 3 — відцентрові насоси; 4 — інвертор; 5 — донейтралізатор; 6 — фільтрпрес; 7 — напірний бак для відфільтрованого розчину; 8 — випарні апарати; 9 —

барометричний конденсатор; 10 — збірник упареного розчину кальцієвої селітри; 11 — збірник плаву кальцієвої селітри; 12 — барометричний ящик; 13 — охолодні вальці

Варто зауважити, що конкретний процес виробництва кальцієвої селітри методом лужної абсорбції нітрозних газів може варіюватися залежно від технологічних умов та вимог виробництва.

1.2 Інформаційні технології у виробництві мінеральних добрив.

Інформаційні технології (ІТ) грають важливу роль у виробництві мінеральних добрив. Вони допомагають оптимізувати процеси виробництва, підвищують ефективність і надійність роботи, сприяють автоматизації та контролюють виробництво.

Одним з ключових аспектів використання ІТ є системи автоматизації виробництва. Ці системи дозволяють контролювати та керувати різними процесами, включаючи подачу сировини, моніторинг технологічних параметрів, регулювання умов виробництва та контроль якості продукції. Вони забезпечують точність, швидкість та надійність виробничих операцій, що дозволяє економити час та знижувати витрати.

Іншим важливим аспектом є використання систем управління виробництвом (MES). Ці системи дозволяють збирати та аналізувати дані з різних джерел, таких як датчики, лабораторні вимірювання та інші джерела, щоб забезпечити оптимальне планування та управління виробництвом. Вони дозволяють визначати оптимальні режими роботи, прогнозувати виробничі витрати та забезпечувати належний контроль якості продукції.

ІТ також використовуються для впровадження систем моніторингу та діагностики обладнання. Це дозволяє виявляти та усувати несправності, забезпечувати планове технічне обслуговування та уникати аварійного зупинення виробництва. Візуалізація даних та використання аналітики дозволяють

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

операторам та інженерам здійснювати моніторинг процесів у реальному часі та приймати обґрунтовані рішення щодо оптимізації виробництва.

ІТ також використовуються для покращення логістики та управління ланцюгом постачання. Застосування систем електронного обміну даними (EDI), систем управління складами та систем відстеження товарів дозволяє забезпечити ефективний рух сировини та готової продукції від постачальників до клієнтів.

Загалом, ІТ вирішують численні завдання виробництва мінеральних добрив, сприяючи підвищенню продуктивності, зниженню витрат та покращенню якості продукції. Вони є необхідною складовою сучасних виробничих процесів у цій галузі.

Постійний розвиток технологій, та їх залучення у виробництво мінеральних добрив, сприяють постійному збільшенню об'ємів виробленої продукції, також слід враховувати баланс можливого виробництва і необхідного споживання мінеральних добрив в Україні. Ці дані наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 — Баланс можливого виробництва і необхідного споживання мінеральних добрив в Україні

Види добрив	Потужність по виробництву на 01.01.1995р.	Чисельник, потреба за роками Знаменник, надлишок (+), або дефіцит (-)		
		1995	2000	2005
Мінеральні добрива	4820	6680	8000	8550
всього, у тому числі		-1860	-3180	-3730
Азотні добрива	3004	2480	2900	3190
		+524	+104	-186
Фосфорні добрива	1504	2300	2800	2960
		-796	-1296	-1456
Калійні добрива	312	1900	2300	2400
		-1588	-1988	-2088

Також важливо зазначити динаміку використання мінеральних добрив у сільськогосподарському секторі української економіки.

Таблиця 1.4 — Динаміка внесення у поживних речовинах мінеральних добрив сільськогосподарськими підприємствами України

Показники	2015	2016	2017	2017 у % до 2015
Внесено добрив під урожай звітного року, тис ц	14150,1	17288,5	20280,8	143,3
Зокрема азотних	9849,6	11973,8	13653,1	138,6
Фосфорних	2232,1	2870,1	3634,3	162,
Калійних	2068,4	2444,6	2993,4	144,7
Внесено добрив на 1га удобреної площі, кг	98	110	123	125,5
Загальна посівна площа, тис.га	17889,1	17982,2	18424,8	103,0
Внесено добрив під посіви усіх культур, тис ц	14119,9	17244,0	20238,0	143,3
Удобрена площа, тис га	14454,7	15637,9	16472,3	114,0
Частка удобреної площі, %	80,8	87,0	89,4	110,6
Внесено добрив на 1га посівної площі, кг	79	96	110	139,2
Зокрема під зернові та зернобобові культури	90	111	124	137,8
З них під пшеницю	89	114	128	143,8
Кукурудзу на зерно	112	130	143	127,7
Технічні культури	67	79	94	140,3
З них під цукрові буряки	274	265	295	107,7
Льон-довгунець	87	136	153	175,9
Соняшник на зерно	50	67	80	160,0

Ріпак	140	163	165	117,9
Сою	54	63	68	125,9
Картоплю	276	319	359	130,1
Овочі та баштанні культури	173	195	233	134,7
Кормові культури	34	42	54	158,8
З них під кукурудзу на силос і зелений корм	60	71	88	146,7
Трави сіяні	17	24	30	176,5

1.3 Аналіз математичних моделей виробництва мінеральних добрив

Аналіз математичних моделей виробництва мінеральних добрив є важливим інструментом для прогнозування, оптимізації та управління процесами виробництва. Використання математичних моделей дозволяє розуміти та описувати взаємозв'язки між різними факторами, які впливають на виробництво мінеральних добрив. Ось кілька ключових аспектів аналізу математичних моделей в цьому контексті:

Прогнозування виробництва: Математичні моделі можуть бути використані для прогнозування виробництва мінеральних добрив на основі вхідних параметрів, таких як доступні ресурси, попит на ринку, технологічні обмеження тощо. Це допомагає планувати виробництво, управляти запасами та оптимізувати ресурси.

Оптимізація процесів: Математичні моделі можуть бути використані для оптимізації різних процесів виробництва, таких як вибір сировини, налаштування параметрів обладнання, розподіл ресурсів тощо. Вони дозволяють знайти оптимальні рішення з урахуванням обмежень і вимог виробництва.

Аналіз ефективності: Математичні моделі можуть допомогти аналізувати ефективність виробничих процесів та ідентифікувати фактори, що впливають на продуктивність. Це може включати оцінку використання ресурсів, визначення проблемних зон та встановлення причин втрат чи недоліків.

Моделювання реакцій та процесів: Математичні моделі дозволяють описувати реакції та процеси, які відбуваються у виробництві мінеральних добрив. Це дозволяє краще розуміти хімічні та фізичні взаємодії, встановлювати оптимальні умови для отримання бажаного продукту та уникнення небажаних побічних ефектів.

Вирішення проблем: Математичні моделі можуть бути використані для вирішення конкретних проблем у виробництві мінеральних добрив. Наприклад, вони можуть допомогти виявити оптимальні режими роботи обладнання, знизити витрати на сировину або зменшити вплив на навколишнє середовище.

Аналіз математичних моделей у виробництві мінеральних добрив дозволяє зрозуміти та покращити процеси виробництва, забезпечити ефективне використання ресурсів та покращити якість продукції. Важливо розробляти моделі, які відповідають конкретним умовам та особливостям виробництва, і активно використовувати їх для прийняття рішень та управління процесами.

1.4 Системи управління при виробництві мінеральних добрив

Системи управління при виробництві мінеральних добрив грають важливу роль у забезпеченні ефективності та якості виробництва. Ось деякі з них:

Системи автоматизації: Виробництво мінеральних добрив може бути повністю або частково автоматизоване. Системи автоматизації виробництва мінеральних добрив використовуються для оптимізації технологічних процесів, забезпечення ефективності та якості виробництва. Основними складовими систем автоматизації є наступні елементи:

Сенсори і вимірювальні пристрої: Виробництво мінеральних добрив вимагає точного контролю параметрів, таких як температура, тиск, рівень, концентрація речовин тощо. Сенсори та вимірювальні пристрої використовуються для збору даних про ці параметри в реальному часі. Ці дані використовуються для контролю та регулювання процесів.

Актуатори та виконавчі пристрої: Актуатори використовуються для керування рухом, потоком матеріалів та іншими параметрами в процесі виробництва.

Вони забезпечують автоматичне виконання команд, отриманих від системи управління. Актуатори можуть бути електромеханічними, гідравлічними або пневматичними.

Системи управління: Системи управління включають програмне забезпечення та алгоритми, що керують процесами виробництва. Вони отримують дані від сенсорів, аналізують їх і приймають рішення щодо оптимального режиму роботи системи. Системи управління можуть бути програмовані для автоматичного керування різними етапами виробництва мінеральних добрив.

Мережі зв'язку та збереження даних: Велика кількість даних, що збирається в процесі виробництва, потребує ефективного зберігання та передачі. Мережі зв'язку дозволяють передавати дані між різними пристроями та системами. Збереження даних відбувається в базах даних, які забезпечують доступ до історичних даних для аналізу та оптимізації процесів.

Візуалізація та моніторинг: Системи автоматизації виробництва мінеральних добрив також включають інтерфейси візуалізації та моніторингу. Ці інтерфейси дозволяють операторам відстежувати роботу системи, відображати дані та параметри процесів в реальному часі, а також здійснювати керування та внесення змін у налаштування системи.

Використання систем автоматизації при виробництві мінеральних добрив допомагає підвищити ефективність, якість та безпеку процесів. Вони забезпечують точний контроль, автоматичне керування та можливість аналізу даних для прийняття рішень. Крім того, вони сприяють зменшенню витрат, оптимізації ресурсів та скороченню часу виробництва, що робить їх незамінними компонентами в сучасному виробництві мінеральних добрив.

Системи контролю якості: Виробництво мінеральних добрив потребує постійного контролю якості, щоб забезпечити відповідність продукції стандартам та вимогам. Системи контролю якості включають аналітичні лабораторії зі спеціалізованою обладнанням для вимірювання концентрації поживних речовин та

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

інших параметрів. Крім того, можуть застосовуватися методи статистичного контролю якості для виявлення відхилень та попередження виробничих недоліків. Основні аспекти систем контролю якості включають наступні елементи:

Вхідний контроль: Цей етап включає перевірку якості вхідних матеріалів і сировини, які використовуються в процесі виробництва мінеральних добрив. Він може включати аналіз фізичних, хімічних та біологічних параметрів для переконання в якості вхідних матеріалів.

Проміжний контроль: Проміжний контроль проводиться протягом процесу виробництва мінеральних добрив, для перевірки якості на різних етапах. Це може включати вимірювання параметрів процесу, аналіз зразків та перевірку відповідності заданим стандартам.

Контроль якості продукції: Цей етап включає остаточну перевірку якості готової продукції перед її випуском на ринок. Він може включати фізичні, хімічні та біологічні тести, аналіз зразків та порівняння з встановленими стандартами якості.

Системи моніторингу: Виробництво мінеральних добрив може включати використання систем моніторингу, які постійно контролюють ключові параметри процесу та якості продукції. Ці системи можуть бути автоматизованими, вимірюючи параметри в реальному часі, а також здатними сповіщати про будь-які відхилення від заданих параметрів.

Сертифікація та стандартизація: Виробництво мінеральних добрив часто пов'язане з вимогами щодо сертифікації та стандартизації якості. Системи контролю якості повинні враховувати встановлені стандарти та проходити процедури сертифікації для підтвердження якості продукції.

Високоякісне виробництво мінеральних добрив потребує ефективних систем контролю якості. Вони допомагають забезпечити високу якість продукції, відповідність стандартам та задоволення вимог споживачів. Крім того, системи контролю якості дозволяють виявляти потенційні проблеми в процесі виробництва та приймати вчасні заходи для їх усунення, що сприяє підвищенню продуктивності та зниженню відходів.

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Системи управління виробництвом (MES): MES (Manufacturing Execution Systems) включають програмні рішення для керування всіма аспектами виробництва. Вони є важливою складовою для ефективного функціонування виробничих процесів та досягнення поставлених цілей. Вони включають комплекс інформаційних технологій, програмного забезпечення, аналітичні методи та стратегії, спрямовані на планування, контроль, координацію та оптимізацію виробничих процесів.

Основні складові систем управління виробництвом мінеральних добрив включають:

Планування виробництва: Ця складова включає розробку оптимальних планів виробництва, враховуючи наявні ресурси, попит, технологічні обмеження та інші фактори. Планування виробництва визначає обсяги виробництва, часові рамки, послідовність операцій та розподіл ресурсів.

Контроль виробництва: Ця складова включає системи моніторингу та контролю параметрів виробництва, таких як температура, тиск, концентрація речовин, швидкість процесу та інші важливі показники. Контроль виробництва дозволяє виявляти відхилення від заданих параметрів та приймати відповідні корективні заходи.

Інвентаризація та управління матеріалами: Ця складова включає системи, що відстежують запаси сировини, матеріалів та готової продукції. Вони допомагають оптимізувати процеси замовлення, поставки та складування матеріалів, щоб забезпечити належний рівень запасів та уникнути переповнення або нестачі.

Управління якістю: Ця складова включає системи контролю якості та дотримання стандартів якості продукції. Вона включає перевірку якості на кожному етапі виробництва, від початкових матеріалів до готової продукції. Управління якістю забезпечує відповідність продукції встановленим стандартам та вимогам клієнтів.

Аналітика та оптимізація: Ця складова включає використання аналітичних методів та інструментів для збору, аналізу та інтерпретації даних про виробництво.

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Це дозволяє виявляти тренди, прогнозувати попит, виявляти проблемні області та вдосконалювати процеси виробництва для досягнення оптимальних результатів.

Системи управління виробництвом мінеральних добрив допомагають підвищити продуктивність, знизити витрати, покращити якість та забезпечити ефективне функціонування виробничих процесів. Вони є важливим інструментом для досягнення конкурентних переваг на ринку та задоволення вимог споживачів.

Системи управління енергоефективністю: У виробництві мінеральних добрив велика увага приділяється енергоефективності. Такі системи управління є важливою складовою для забезпечення економічної та екологічної сталості виробничого процесу. Оскільки виробництво мінеральних добрив може вимагати значних енергетичних ресурсів, ефективне використання енергії стає ключовим фактором для зниження витрат та впливу на навколишнє середовище. Основні елементи систем управління енергоефективністю виробництва мінеральних добрив включають:

Моніторинг енергоспоживання: Ця складова передбачає встановлення систем моніторингу, які забезпечують постійний контроль за енергоспоживанням усіх етапів виробничого процесу. Вони можуть використовувати датчики та прилади для збору даних про споживання енергії та передавати ці дані до центральної системи управління.

Аналіз та оптимізація: На основі зібраних даних про енергоспоживання проводиться аналіз для виявлення недоліків та можливостей для оптимізації споживання енергії. Це може включати ідентифікацію енергоефективних технологій, вдосконалення режимів роботи та встановлення цілей з енергозбереження.

Впровадження енергоефективних технологій: Системи управління енергоефективністю сприяють впровадженню нових технологій та методів, що дозволяють знизити споживання енергії. Це можуть бути поліпшені системи освітлення, використання ефективних електродвигунів, оптимізація процесів теплогенерації та інші заходи.

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Управління навантаженням: Системи управління енергоефективністю допомагають оптимізувати навантаження електроенергії та розподіляти його відповідно до потреб виробництва. Це може включати використання систем управління піками навантаження, децентралізоване управління та використання енергетичних систем з розподіленим управлінням.

Підводячи підсумки використання систем управління енергоефективністю при виробництві мінеральних добрив, слід видалити наступні аспекти:

— Використання систем управління енергоефективністю дозволяє знизити витрати на енергію та покращити економічну ефективність виробництва мінеральних добрив.

— Моніторинг енергоспоживання та аналіз даних є важливими кроками для виявлення можливостей з енергозбереження та оптимізації процесів.

— Впровадження енергоефективних технологій та управління навантаженням можуть допомогти знизити споживання енергії та зменшити вплив на довкілля.

— Системи управління енергоефективністю сприяють досягненню сталого розвитку та відповідності енергетичним стандартам та регуляторним вимогам.

Загальною метою впровадження систем управління енергоефективністю є забезпечення ефективного використання енергії, зниження витрат та впливу на довкілля, а також покращення конкурентоспроможності підприємства в галузі виробництва мінеральних добрив.

Системи управління безпекою: Дані системи є важливою складовою виробництва мінеральних добрив, оскільки цей процес може включати потенційні ризики для працівників, обладнання та навколишнього середовища. Тому забезпечення безпеки під час виробництва мінеральних добрив є пріоритетним завданням.

Основні складові систем управління безпекою при виробництві мінеральних добрив включають:

Оцінка ризиків: Проведення оцінки ризиків є першим кроком у визначенні потенційних небезпек та визначенні заходів для їх запобігання. Це включає

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ідентифікацію потенційних небезпек, визначення рівня ризику та розробку планів управління ризиками.

Впровадження стандартів безпеки: Встановлення та дотримання стандартів безпеки є важливим аспектом систем управління безпекою. Це може включати встановлення правил та процедур безпеки, навчання персоналу, використання захисного обладнання та контроль за виконанням правил.

Нагляд та контроль: Системи управління безпекою передбачають постійний нагляд та контроль за виробничими процесами з метою виявлення потенційних небезпек та вжиття відповідних заходів. Це може включати моніторинг робочих місць, інспекції та аудити, аналіз аварійних ситуацій та впровадження системи повідомлення про аварії.

Навчання та свідомість персоналу: Ефективна система управління безпекою передбачає навчання та підвищення свідомості персоналу стосовно безпеки та процедур управління ризиками. Це може включати проведення навчальних курсів, тренінгів та свідомість щодо правильного використання обладнання та виконання процедур безпеки.

Аварійне планування та реагування: Розробка аварійних планів та процедур реагування є важливою складовою системи управління безпекою. Це включає ідентифікацію потенційних аварійних ситуацій, розробку планів дій та тренування персоналу щодо їх виконання.

Після розгляду складових систем управління безпекою при виробництві мінеральних добрив, ми можемо зробити наступні висновки:

— Системи управління безпекою є необхідною складовою процесу виробництва мінеральних добрив для запобігання потенційним небезпекам та забезпечення безпечних умов для працівників та оточуючого середовища.

— Оцінка ризиків, впровадження стандартів безпеки, нагляд та контроль, навчання персоналу та аварійне планування є важливими елементами систем управління безпекою.

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

— Ефективна система управління безпекою допомагає знизити ризики та аварійні ситуації, забезпечує виконання вимог стандартів безпеки та сприяє створенню безпечного робочого середовища.

— Постійне навчання персоналу та підвищення свідомості про безпеку є важливими аспектами управління безпекою.

Загальною метою систем управління безпекою при виробництві мінеральних добрив є забезпечення безпечного та надійного виробництва з мінімізацією ризиків для працівників, обладнання та довкілля.

Висновки

За результатами дослідницької роботи, можна зробити наступні висновки після огляду складових процесу виробництва мінеральних добрив, інформаційних технологій та математичних моделей у процесі виробництва:

Складові процесу виробництва мінеральних добрив: Процес виробництва мінеральних добрив включає такі складові, як зневоднення, гранулювання, сушіння, зберігання та упаковка. Кожна з цих складових має свої особливості та вимоги, які потрібно враховувати при проектуванні технологічних процесів.

Інформаційні технології: Використання інформаційних технологій в виробництві мінеральних добрив може значно покращити ефективність та контроль за процесами. Це включає використання сенсорів для збору даних, системи зберігання та обробки інформації, автоматичне керування та моніторинг процесів, аналітичні інструменти для аналізу даних та прийняття рішень, а також безпекові рішення.

Математичні моделі: Математичне моделювання процесів у виробництві мінеральних добрив дозволяє глибше розуміння фізичних процесів, прогнозування результатів та оптимізацію параметрів. Математичні моделі можуть бути використані для аналізу різних сценаріїв, планування режимів виробництва та вдосконалення процесів.

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Взаємодія складових: Складові процесу виробництва мінеральних добрив взаємодіють між собою, і успішне впровадження інформаційних технологій та математичних моделей вимагає забезпечення збалансованої та ефективної взаємодії між цими складовими.

Враховуючи ці складові та їх взаємозв'язок, можна покращити якість, ефективність та стабільність процесу виробництва мінеральних добрив. Однак, для успішної реалізації цих технологій необхідна глибока експертна домінуюча та належна інтеграція всіх компонентів системи.

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНЕВОДНЕННЯ І ГРАНУЛЮВАННЯ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

Математичне моделювання процесів зневоднення і гранулювання у псевдозрідженому шарі при виробництві мінеральних добрив є важливим інструментом для аналізу та оптимізації цих процесів. Такі моделі дозволяють розуміти фізичні взаємодії, управляти параметрами та прогнозувати поведінку системи.

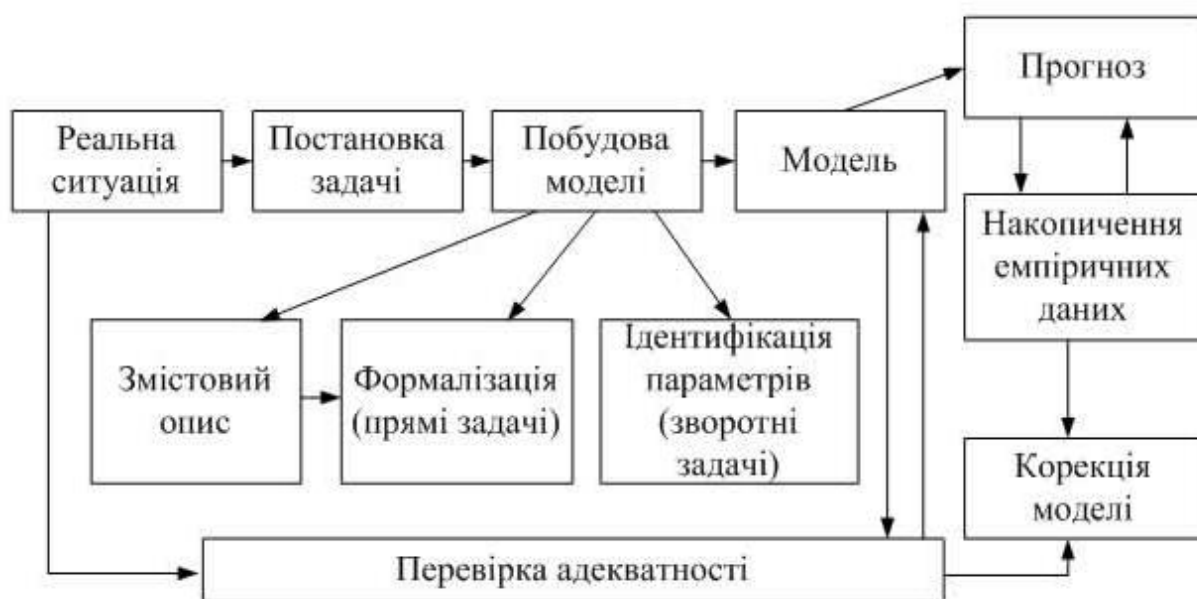


Рисунок 2.1 — Алгоритм побудови математичної моделі

Основні етапи математичного моделювання процесів зневоднення і гранулювання у псевдозрідженому шарі включають:

Формулювання математичних рівнянь: Спочатку потрібно сформулювати математичні рівняння, що описують фізичні процеси зневоднення і гранулювання в псевдозрідженому шарі. Ці рівняння можуть включати закони збереження маси, руху, тепла тощо. Вони повинні враховувати взаємодію між фазами (рідина, газ, твердий матеріал) та реологічні характеристики матеріалів.

Параметризація моделі: Після формулювання математичних рівнянь потрібно визначити параметри моделі, такі як розміри частинок, в'язкість, поверхневі

напруження тощо. Ці параметри можуть бути визначені експериментально або шляхом використання відповідних кореляцій.

Розв'язування математичних рівнянь: Після визначення параметрів моделі необхідно розв'язати математичні рівняння, використовуючи чисельні методи. Це може включати методи скінченних різниць, методи скінченних елементів або методи дискретних частин.

Перевірка та валідація моделі: Останній етап полягає в перевірці та валідації моделі шляхом порівняння результатів моделювання з експериментальними даними. Якщо модель добре відтворює експериментальні результати, її можна використовувати для подальших досліджень та оптимізації процесів.

Математичне моделювання процесів зневоднення і гранулювання у псевдозрідженому шарі дозволяє прогнозувати оптимальні параметри процесів, покращувати ефективність та якість продукції, знижувати витрати та мінімізувати експериментальні випробування. Важливо пам'ятати, що точність моделі залежить від якості вхідних даних та адекватності використаних математичних рівнянь.

2.1 Метод математичного моделювання на основі двохфазного підходу.

Метод математичного моделювання на основі двохфазного підходу використовується для дослідження та аналізу процесів, які складаються з двох фаз або компонентів, таких як рідина і тверда фаза, газ і рідина тощо. Цей метод дозволяє враховувати взаємодію між фазами та вивчати їх поведінку в різних умовах.

Основні принципи методу математичного моделювання на основі двохфазного підходу включають:

Розподіл рівнянь для кожної фази: У рамках цього підходу розробляються окремі рівняння для кожної фази з урахуванням їх характеристик і властивостей. Наприклад, для рідини можуть використовуватися рівняння Нав'є-Стокса, а для твердої фази - рівняння збереження маси і руху.

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Урахування взаємодії між фазами: Для врахування взаємодії між фазами в моделі використовуються додаткові терміни та рівняння. Наприклад, можуть враховуватися процеси масообміну, теплопередачі, хімічних реакцій тощо між фазами.

Урахування границь розділу: Важливо враховувати границі розділу між фазами у моделі. Це може включати поверхні розділу, інтерфейси та умови, які визначають перехід маси, енергії та інших характеристик між фазами.

Чисельні методи розв'язування: Для розв'язування системи рівнянь, що описують двофазні процеси, використовуються чисельні методи. Це можуть бути методи скінченних різниць, методи скінченних елементів або інші методи, які дозволяють апроксимувати та розв'язувати складні рівняння.

Метод математичного моделювання на основі двофазного підходу дозволяє отримати детальні та точні результати щодо поведінки системи з двома фазами. Він застосовується в різних галузях, включаючи виробництво мінеральних добрив, де важливо вивчати і оптимізувати процеси зневоднення і гранулювання для покращення якості та ефективності виробництва.

Основні рівняння, які можуть бути використані в методі математичного моделювання на основі двофазного підходу, включають:

Рівняння руху рідини: Це рівняння описує рух рідини у псевдозрідженому шарі та враховує такі фактори, як гравітація, в'язкість рідини та тиск. Дане рівняння, може бути використане в методі математичного моделювання на основі двофазного підходу, зазвичай є модифікованою версією рівняння Нав'є-Стокса для урахування особливостей процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі.

Основне рівняння руху рідини у тривимірному просторі має вигляд:

$$\partial(\rho v)/\partial t + \nabla(\rho \vec{v} \cdot \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g$$

де:

ρ - густина рідини,

$\vec{v}$ - вектор швидкості руху рідини,

t - час,

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

p - тиск,

∇ - оператор градієнта,

τ - в'язкість рідини,

g - прискорення вільного падіння.

Це рівняння описує зміну руху рідини в часі та просторі. Ліва сторона рівняння відображає зміну кількості руху рідини, права сторона враховує сили, що діють на рідину, такі як градієнт тиску, в'язкі сили та сила тяжіння.

У випадку двохфазного підходу можуть бути використані додаткові терміни або модифікації цього рівняння для врахування взаємодії рідини з частинками, такими як частинки добрив або інші речовини, присутні в процесі зневоднення та гранулювання.

Враховуючи специфічні умови та особливості виробництва мінеральних добрив, рівняння руху рідини може бути додатково модифіковане для врахування таких факторів, як пористість середовища, перенос маси та тепла, реакції, додаткові сили та інші параметри, що впливають на процес зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі.

Рівняння дифузії: Дане рівняння використовується для опису процесу переносу речовини у псевдозрідженому шарі під час зневоднення та гранулювання при виробництві мінеральних добрив. Це рівняння враховує концентраційний градієнт та дифузійні властивості речовини у середовищі.

Загальний вигляд рівняння дифузії має наступний вигляд:

$$\partial C / \partial t = D \nabla^2 C$$

де:

C - концентрація речовини,

t - час,

D - коефіцієнт дифузії,

∇^2 - оператор Лапласа.

Рівняння вказує на зміну концентрації речовини з часом внаслідок розподілу речовини в просторі залежно від концентраційного градієнта. Коефіцієнт дифузії D

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

визначає швидкість дифузії речовини і залежить від властивостей самої речовини та характеристик середовища, через яке відбувається дифузія.

Враховуючи специфічні умови та особливості виробництва мінеральних добрив, рівняння дифузії може бути модифіковане або розширене для врахування додаткових факторів, таких як хімічні реакції, масові переноси, температурні градієнти та інші фізичні впливи, що впливають на процес зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі.

Рівняння збереження маси та енергії: Ці рівняння є важливими компонентами математичних моделей при виробництві мінеральних добрив. Вони дозволяють описати перенос речовини та енергії у системі і врахувати різноманітні процеси, що відбуваються під час виробництва.

Рівняння збереження маси: Це рівняння описує зміну маси речовини в системі з часом і може мати наступний вигляд:

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = S$$

де:

ρ - густина речовини,

t - час,

$\mathbf{v}$ - вектор швидкості руху речовини,

∇ - оператор градієнта,

S - джереловий або стіканняй термін, який враховує зовнішні джерела маси (наприклад, подачу сировини або видалення відходів).

Рівняння збереження енергії: Це рівняння описує зміну енергії в системі з часом і може мати наступний вигляд:

$$\partial (\rho E) / \partial t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} E) = Q - W$$

де:

E - енергія,

Q - джереловий термін, який враховує постачання або втрату енергії від зовнішніх джерел (наприклад, нагрівання або охолодження),

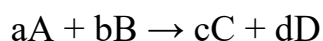
W - робота, яка враховується, якщо система здійснює механічну роботу.

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Рівняння збереження маси та енергії є фундаментальними рівняннями у технологічних процесах виробництва мінеральних добрив. Вони використовуються для моделювання та аналізу переносу речовини, теплових процесів, хімічних реакцій та інших важливих аспектів у системі виробництва. З їх допомогою можна прогнозувати та оптимізувати параметри технологічних процесів, підвищувати ефективність виробництва та забезпечувати високу якість мінеральних добрив.

Рівняння реакцій: Якщо в процесі зневоднення та гранулювання відбуваються хімічні реакції, то можуть бути використані рівняння реакцій для опису цих процесів. Ці реакції можуть включати різні хімічні сполуки, які взаємодіють і перетворюються у бажані продукти.

Загальний вигляд рівняння реакції може бути поданий наступним чином:



де:

A та B - реагенти, що беруть участь у реакції,

C та D - продукти реакції,

a, b, c, d - стехіометричні коефіцієнти, що вказують на кількість молекул реагентів та продуктів, необхідних для здійснення реакції.

Рівняння реакцій виробництва мінеральних добрив можуть бути більш складними і включати додаткові параметри, такі як температура, тиск, концентрація реагентів та інші фактори, які впливають на кінетику реакції. Такі рівняння можуть бути використані для моделювання та прогнозування процесів хімічних перетворень, оптимізації умов виробництва та контролю якості мінеральних добрив.

Це лише загальні рівняння, які можуть бути використані в методі математичного моделювання на основі двохфазного підходу. В конкретному випадку вибір рівнянь залежить від конкретної системи виробництва мінеральних добрив та її особливостей.

2.2 Еталонна математична модель процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі, та її особливості.

Гранулятори з псевдозрідженим шаром (pseudo-fluidized bed granulators) є одним з типів обладнання, що використовується в процесі гранулювання, зокрема при виробництві мінеральних добрив. Вони відіграють важливу роль у формуванні гранул зі сипких матеріалів.

Основна ідея грануляторів із псевдозрідженим шаром полягає у створенні псевдозрідженого (псевдорідинного) шару матеріалу в грануляторі. Цей шар поводить себе подібно до рідини, хоча фактично складається з сипкого матеріалу. Псевдозріджений шар утворюється завдяки потоку повітря або іншого газу, що пропускається через гранулятор.

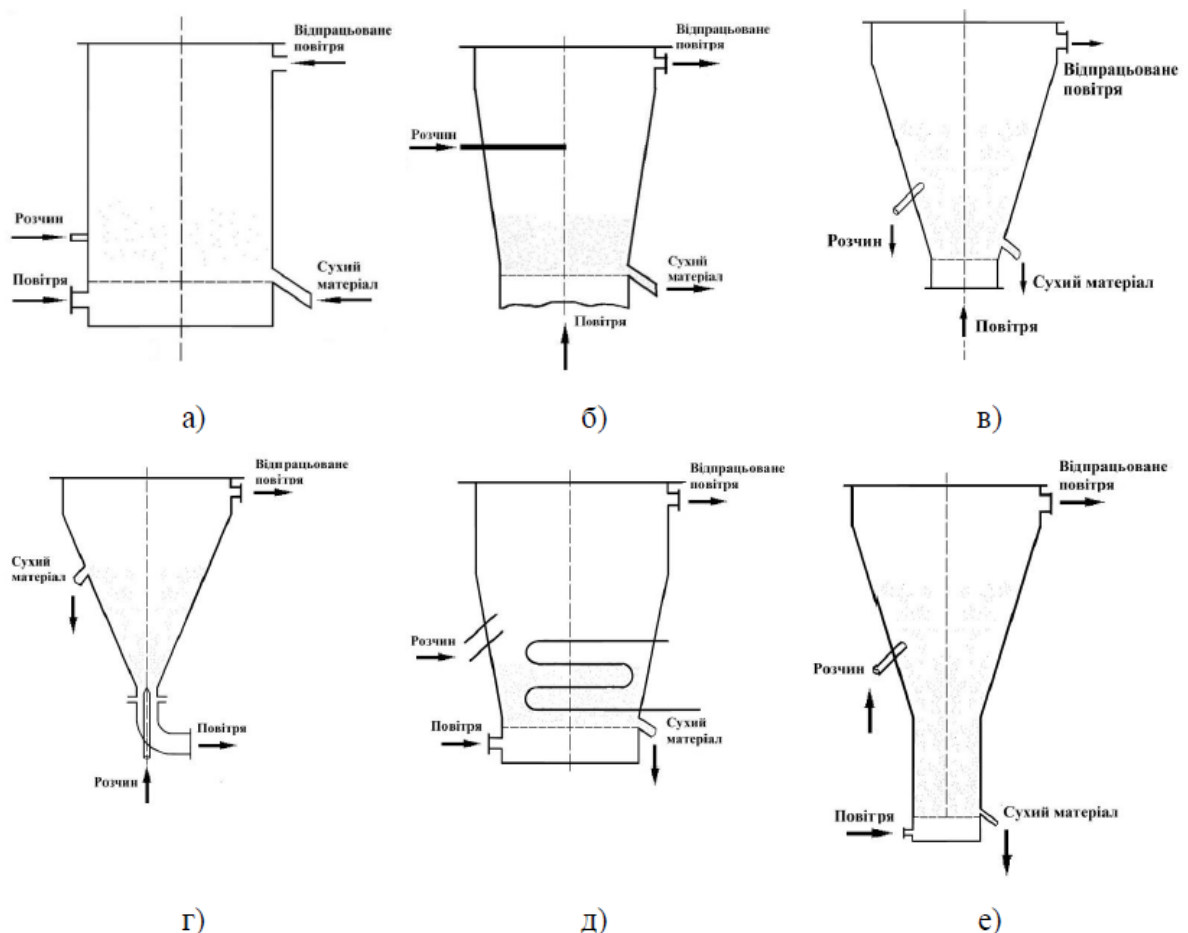


Рисунок 2.2 — Схеми основних типів грануляторів із псевдозрідженим шаром:

а – апарат з введенням розчину збоку в шар; б – апарат із введенням розчину зверху над шаром; в – апарат із фонтануючим шаром і введенням розчину збоку; г

– апарат із фонтануючим шаром і введенням розчину знизу; д – апарат із комбінованим підведенням тепла і введенням розчину збоку; е – апарат із внутрішнім сепаратором.

Процес гранулювання в грануляторах з псевдозрідженим шаром відбувається наступним чином:

Наповнення матеріалу: Сипкий матеріал, який планують гранулювати, додається до гранулятора. Матеріал розподіляється по всій поверхні псевдозрідженого шару.

Утворення псевдозрідженого шару: Через гранулятор пропускається потік повітря або газу знизу вгору. Цей потік створює псевдорідинний режим, утримуючи матеріал у стані псевдозрідженого шару.

Змочування та злиплення: У псевдозрідженому шарі матеріал змочується рідиною, яка може бути додана або утворюватися в процесі гранулювання. Це змочування сприяє злипленню частинок матеріалу, формуючи гранули.

Рост гранул: Завдяки злипленню частинок матеріалу, гранули поступово зростають у розмірі. У процесі гранулювання можуть бути застосовані додаткові технології, такі як розпилення рідини або використання агента злиплення, для підвищення ефективності формування гранул.

Видалення гранул: Сформовані гранули видаляються з гранулятора для подальшої обробки, такої як сушіння або охолодження.

Гранулятори з псевдозрідженим шаром дозволяють отримувати гранули з бажаними розміром, формою і властивостями. Вони використовуються в різних галузях, включаючи виробництво мінеральних добрив, де гранули важливі для оптимального використання та розподілу поживних речовин у ґрунті.

Еталонна математична модель процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі є складною системою рівнянь, яка описує фізичні процеси, що відбуваються в шарі з матеріалу під час зневоднення та гранулювання. Ця модель зазвичай базується на основних принципах масообміну, теплопередачі та руху матеріалу в шарі. Еталонна математична модель може включати наступні складові:

Рівняння збереження маси та руху, які попередньо були описані.

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Рівняння теплопередачі: Це рівняння використовується для опису передачі тепла у технологічних процесах виробництва мінеральних добрив. Це рівняння дозволяє моделювати та аналізувати теплові процеси, такі як нагрівання, охолодження, теплообмін, що відбуваються в системі.

Загальне рівняння теплопередачі, використовуване в цих процесах, називається рівнянням теплової рівноваги і має наступний вигляд:

$$\rho c \partial T / \partial t = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q$$

де:

ρ - густина матеріалу,

c - його теплоємність,

T - температура,

t - час,

k - коефіцієнт теплопровідності матеріалу,

∇ - оператор градієнта,

Q - джереловий термін, що враховує зовнішні джерела тепла (нагрівання або охолодження).

Рівняння теплопередачі дозволяє моделювати розподіл температури у системі та прогнозувати теплові процеси, що відбуваються в процесі виробництва мінеральних добрив. Воно є важливим інструментом для оптимізації технологічних параметрів, контролю температурного режиму та забезпечення якості продукції.

Рівняння зв'язку між вологою та механічними властивостями матеріалу: Це рівняння описує залежність між вмістом води в матеріалі та його механічними властивостями, такими як прочність, текучість тощо. Зазвичай таке рівняння враховує ефекти поглинання, випаровування та дифузії води у матеріалі.

Одним з найпоширеніших рівнянь для опису залежності між вологою та механічними властивостями матеріалу є рівняння впливу вологості на модуль пружності (E):

$$E = E_0 \cdot f(\theta)$$

де:

E_0 - початковий модуль пружності матеріалу (при нульовій вологості),

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

θ - відносна вологість матеріалу,

$f(\theta)$ - функція, що описує залежність між вологою та модулем пружності.

Для конкретних матеріалів можуть використовуватися різні емпіричні моделі, або фізико-хімічні рівняння для опису цього зв'язку. Ці моделі враховують особливості механічної поведінки матеріалу при зміні вологості і можуть базуватися на експериментальних даних.

Врахування зв'язку між вологою та механічними властивостями матеріалу дозволяє більш точно моделювати поведінку матеріалу в умовах зміни вологості, що може бути важливим при виробництві мінеральних добрив.

Рівняння кінетики хімічних реакцій (опціонально): Якщо в процесі зневоднення та гранулювання відбуваються хімічні реакції, то модель може включати рівняння, які описують кінетику цих реакцій. Вони вказують на залежність швидкості реакції від концентрацій реагентів, температури та інших факторів.

Одним з найпоширеніших рівнянь кінетики реакцій є рівняння швидкості реакції, яке має такий загальний вигляд:

$$v = k[A]^a[B]^b$$

де:

v - швидкість реакції,

k - константа швидкості реакції,

$[A]$ та $[B]$ - концентрації реагентів А та В,

a та b - порядки реакції щодо реагентів А та В.

Рівняння кінетики можуть бути лінійними або нелінійними відносно концентрацій реагентів. Для складних реакцій, що включають кілька етапів, можуть використовуватися системи диференціальних рівнянь, що описують кінетику кожного окремого етапу.

Залежно від характеру реакції та механізму протікання, рівняння кінетики можуть бути досить складними та вимагати використання емпіричних або фізико-хімічних моделей для їх опису. Експериментальні дослідження швидкості реакції дозволяють встановити відповідне рівняння кінетики для конкретної реакції.

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Знання рівнянь кінетики хімічних реакцій важливо для проектування та оптимізації технологічних процесів виробництва мінеральних добрив, контролю якості та покращення ефективності реакційних систем.

Ці складові рівняння формують систему диференціальних або інтегральних рівнянь, які можуть бути розв'язані чисельними методами, такими як метод скінченних елементів або метод скінченних різниць. Параметри моделі, такі як фізичні властивості матеріалу, режими процесу та початкові умови, встановлюються на основі експериментальних даних та технічного досвіду.

Модель може бути використана для аналізу та оптимізації процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі, шляхом визначення впливу різних параметрів на якість та продуктивність процесу. Також, вона може бути використана для прогнозування поведінки системи в різних умовах та для планування оптимальних режимів виробництва.

Важливо зауважити, що еталонна математична модель є спрощеною апроксимацією реального процесу, і її точність може бути залежною від рівня деталізації та врахування усіх фізичних факторів.

Така математична модель має деякі особливості, які варто враховувати:

Псевдозріджений шар: Модель передбачає наявність псевдозрідженого шару, що складається з матеріалу, який має особливі фізичні властивості. Це може бути матеріал з високим вмістом вологи або матеріал, який може утворювати густу суспензію під час процесу.

Застосування псевдозрідженого шару у еталонній математичній моделі дозволяє краще врахувати особливості процесу зневоднення та гранулювання, такі як розподіл речовини, потоки маси та енергії, реакції та інші фізичні явища, що впливають на якість та результативність процесу виробництва мінеральних добрив.

Взаємодія фаз: Модель повинна враховувати взаємодію між фазами (рідина, тверда фаза, газ), що присутні в псевдозрідженому шарі. Це включає процеси масообміну, теплопередачі, руху матеріалу та інші фізичні явища, що відбуваються в системі.

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						37
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Границі розділу фаз: Загалом це межі між рідиною та твердим матеріалом. Ці границі можуть змінюватися залежно від умов процесу та властивостей матеріалів.

Основні фактори, які визначають границі розділу фаз, включають:

— Вологоутрата: Рідина у псевдозрідженому шарі може втрачатися через процес зневоднення. Границя розділу фаз буде залежати від швидкості випаровування рідини та рівня вологоутрати.

— Концентрація речовини: Розподіл речовини між рідиною та твердим матеріалом може варіювати залежно від концентрації речовини в системі. Границя розділу фаз може змінюватися при зміні концентрації речовини.

— Температура: Температура також впливає на границі розділу фаз. Зі збільшенням температури може відбуватися теплопередача, що може призводити до зміни фазового стану речовини та зміни границі розділу фаз.

— Тиск: Тиск є ще одним фактором, що впливає на границі розділу фаз. Високий тиск може сприяти збільшенню розчинності речовини у рідині та зміні границі розділу фаз.

Враховуючи ці фактори, еталонна математична модель може визначати границі розділу фаз та враховувати їх вплив на процес зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі.

Динаміка процесу: Модель повинна враховувати динаміку процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. Це означає врахування змін в основних етапах динаміки процесу:

— Завантаження: Матеріал, що має бажані властивості для гранулювання, вводиться в псевдозріджений шар. У цьому етапі рідина повинна володіти оптимальними властивостями, щоб забезпечити утворення рівномірного шару матеріалу.

— Зневоднення: Після завантаження починається процес зневоднення, під час якого рідина випаровується з псевдозрідженого шару. Це може відбуватися шляхом випаровування води або інших розчинників, що містяться у рідині. Зневоднення призводить до утворення структури матеріалу та його гранул.

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

— Гранулювання: Під час зневоднення відбувається формування гранул шляхом зіткнення та агломерації частинок матеріалу. Процес гранулювання відбувається під дією сили, яка сприяє утворенню міцних зв'язків між частинками та формуванню бажаної структури гранул.

— Сушіння: Після гранулювання гранули піддаються сушінню, де вони висихають та отримують необхідну вологу. Сушіння може виконуватися за допомогою тепла або іншого способу видалення вологи з гранул.

— Класифікація та упаковування: Гранули можуть бути класифіковані за розміром або іншими характеристиками. Після класифікації гранули упаковуються для подальшого використання або зберігання.

Динаміка процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі може бути складною та залежить від численних факторів. Математичні моделі та методи моделювання можуть використовуватися для аналізу та оптимізації цих процесів з метою поліпшення ефективності та якості виробництва мінеральних добрив.

Урахування параметрів матеріалу: Модель повинна включати параметри, які характеризують фізичні властивості матеріалу, такі як щільність, теплопровідність, в'язкість тощо. Ці параметри впливають на процеси масообміну, руху матеріалу та теплопередачі.

Передбачення результатів: Еталонна математична модель дозволяє передбачати результати процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі на основі вхідних параметрів та початкових умов. Вона може бути використана для аналізу різних сценаріїв та оптимізації процесу.

Важливо зазначити, що точність еталонної математичної моделі залежить від деталей, включених в модель, а також від якості вхідних даних та параметрів, які використовуються. Валідація моделі за допомогою експериментальних даних та порівняння її результатів з реальними спостереженнями є важливим етапом у підтвердженні точності та застосовності моделі.

2.3 Розробка математичної моделі

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що для забезпечення стійкої кінетики процесу одержання готового продукту із заданими фізико-хімічними властивостями при грануляції у псевдозрідженому шарі необхідною умовою є дотримання заданого температурного режиму у шарі. Тому для дослідження статичних та динамічних характеристик обрано математичну модель із зосередженими параметрами – кінцевою температурою теплоносія та температурою псевдозрідженого шару.

Виділено дві акумулюючі ємності:

- ємність руху теплоносія;
- ємність руху частинок у псевдозрідженому шарі.

Зроблено такі припущення:

- теплообмін між теплоносієм і частинками у псевдозрідженому шарі відбувається завдяки конвекції;
- розчин потрапляючи на частинку випаровується і внаслідок чого відбувається кристалізація на поверхні частинок із виділенням теплоти.

Динаміку теплового балансу теплоносія – повітря можна описати наступним рівнянням:

$$V_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}} \cdot \frac{dT_{\text{пк}}}{dt} = G_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}} \cdot (T_{\text{пш}} - T_{\text{пк}}) - \alpha \cdot F \cdot (T_{\text{пк}} - T_{\text{ш}})$$

де $T_{\text{пш}}$, $T_{\text{пк}}$ – початкова і кінцева температура повітря, К; $T_{\text{ш}}$ – температура шару, К; F – поверхня масообміну, м²; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м²·К; $G_{\text{п}}$ – витрати повітря, м³/с; $C_{\text{п}}$ – теплоємність повітря, Дж/кг·К; $V_{\text{п}}$ – об'єм повітря, м³; $\rho_{\text{п}}$ – густина повітря, кг/м³.

Динаміка теплового балансу частинок псевдозрідженого шару описана наступним чином:

$$m_r \cdot C_r \cdot \frac{dT_{\text{ш}}}{dt} = \alpha \cdot F \cdot (T_{\text{пк}} - T_{\text{ш}}) - \beta \cdot \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot F_{\text{М}}}{R \cdot T_{\text{ш}}} \cdot r \cdot \Delta p + G_p \cdot C_p \cdot T_{\text{рп}} - G_p \cdot q;$$

$$\Delta p = \xi_1 \cdot \Delta T_{\text{пк}} - \xi_2 \cdot \Delta T_{\text{ш}};$$

$$\xi_1 = \frac{\partial p}{\partial T_{\text{пк}}}; \xi_2 = \frac{\partial p}{\partial T_{\text{ш}}};$$

де β – коефіцієнт масовіддачі, м/с; $M_{\text{H}_2\text{O}}$ – молекулярна маса води, кг/моль; F – поверхня масообміну, м²; $F_{\text{М}}$ – поверхня частинки, м²; R – універсальна газова стала, Дж/(моль·К); m_r – маса гранули, кг; C_r теплоємність матеріалу гранули, Дж/кг·К; G_p – витрати розчину, кг/с; Δp – різниця парціальних тисків, Па; x_r – вологовміст матеріалу; $T_{\text{рп}}$ – початкова температура розчину, К; C_p – теплоємність розчину, Дж/кг·К; r – теплота пароутворення, Дж/кг; q – теплота, що виділяється при кристалізації розчину, Дж/кг.

Можливі канали керування: «витрати теплоносія – температура псевдозрідженого шару», «витрати розчину – температура псевдозрідженого шару».

$$G_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}} \cdot (T_{\text{пп}} - T_{\text{пк}}) - \alpha \cdot F \cdot (T_{\text{пк}} - T_{\text{ш}}) = 0;$$

$$\alpha \cdot F \cdot (T_{\text{пк}} - T_{\text{ш}}) - \beta \cdot \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot F_{\text{М}}}{R \cdot T_{\text{ш}}} \cdot r \cdot \Delta p + G_p \cdot C_p \cdot T_{\text{рп}} - G_p \cdot q = 0.$$

З вище згаданих рівнянь отримали вираз для температури псевдозрідженого шару:

$$T_{\text{ш}} = \frac{G_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}} \cdot (T_{\text{пп}} - T_{\text{пк}}) + G_p \cdot C_p \cdot T_{\text{рп}} - G_p \cdot q + \beta \cdot \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot F_{\text{М}}}{R \cdot T_{\text{ш}}} \cdot r \cdot \xi_2 \cdot T_{\text{пк}}}{\beta \cdot \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot F_{\text{М}}}{R \cdot T_{\text{ш}}} \cdot r \cdot \xi_1}$$

Зміна температури псевдо зрідженого шару має лінійний характер і при збільшенні початкової температури теплоносія від 460 К до 475 К відбувається відповідне лінійне збільшення температури шару. Така залежність пояснюється тим, що процес зневоднення плівки розчину відбувається в умовах балансової по

теплоті задачі, що і визначається відповідним значенням температури гранул у шарі (змінюється від 363,6 К до 365 К).

Зміна температури шару від 365,9 К до 365,5 К має обернено пропорційну залежність при збільшенні витрат розчину на 30%.

Динамічні характеристики математичної моделі наведені на рис. 2.3-2.4.

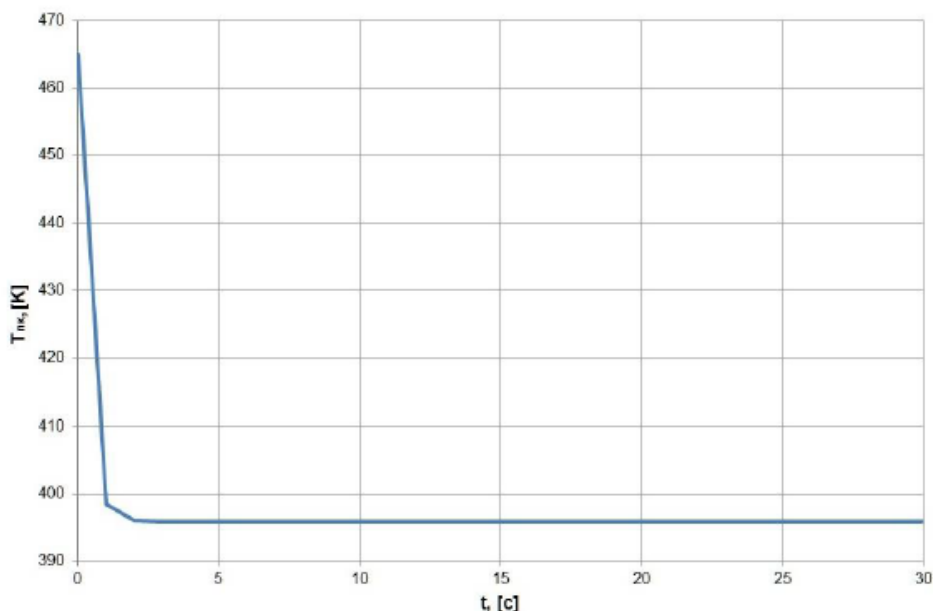


Рисунок 2.3 — Перехідна характеристика за каналом «витрати теплоносія - кінцева температура повітря»

Перехідна характеристика за каналом «витрати теплоносія - кінцева температура повітря», показує, що корисна різниця температур $T=465\text{ К}-395\text{ К}=70\text{ К}$ реалізується за перші 2 с, що підтверджує характеристики апарату з ідеальним перемішуванням. При цьому інтенсивність перемішування зростає із збільшенням масових витрат теплоносія по каналу «витрати теплоносія - кінцева температура повітря».

Перехідна характеристика за каналом «витрати теплоносія – температура псевдозрідженого шару» показує, що стабілізація температури в шарі відбувається на 25 с в межах зміни температури від 365 К до 366,25 К. Така динаміка зміни температури теплоносія в шарі підтверджує інтенсивність перемішування.

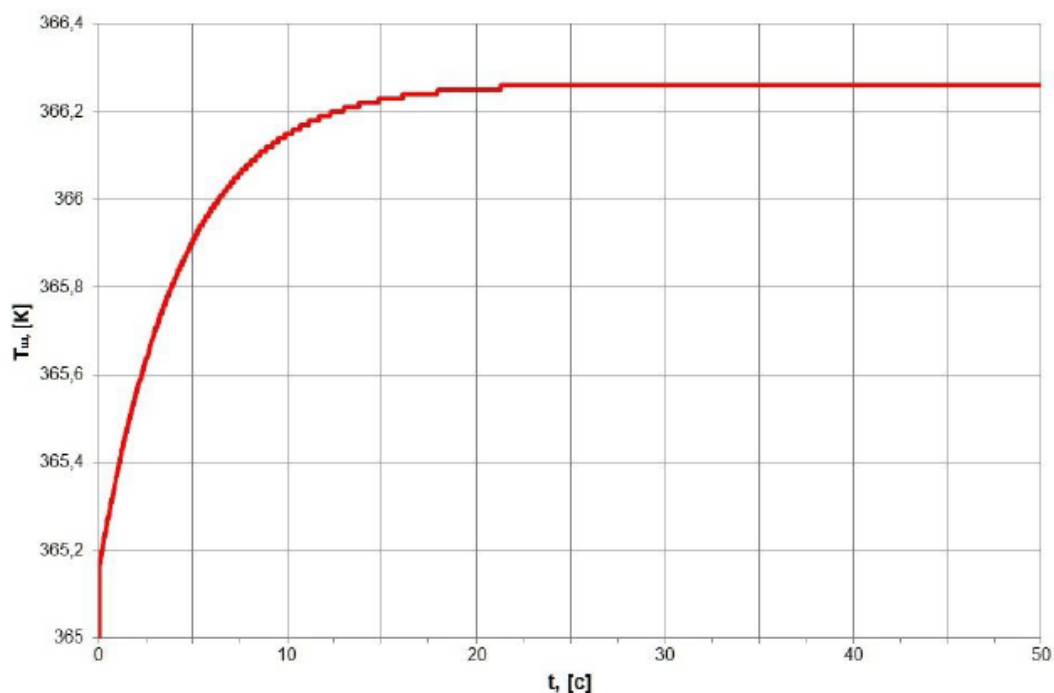


Рисунок 2.4 — Перехідна характеристика за каналом «витрати теплоносія - температура псевдозрідженого шару»

Запропонований статичний метод та математична модель для задач оптимізації описує статичні та динамічні характеристики процесу гранулоутворення у псевдозрідженому шарі та показує зміну температури теплоносія та псевдозрідженого шару при проведенні тепло-масообмінних процесів при русі зернистого матеріалу через відповідні технологічні зони в апараті, що забезпечує одержання гранульованого продукту із заданими властивостями.

Характер зміни температур визначає кінетику гранулоутворення та фізико-механічні властивості гранул. Тому запропонована математична модель може бути використана для створення ефективної системи управління процесом утворення мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі при зневодненні рідких систем.

Висновки

Використання методу на основі двохфазового підходу для процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі має наступні важливі висновки:

Врахування двох фаз (рідинної та твердої) дозволяє більш точно відтворити процеси зневоднення та гранулювання в псевдозрідженому шарі, оскільки вони взаємодіють між собою та впливають на кінцевий результат.

Двофазовий підхід дозволяє моделювати рух та розподіл рідини в псевдозрідженому шарі, а також враховувати процеси зневоднення та випаровування рідини, що є важливими факторами у формуванні структури та властивостей гранул.

Метод на основі двофазового підходу дозволяє уточнити параметри процесу, такі як швидкість зневоднення, розмір та форма гранул, розподіл вологи тощо. Це дозволяє покращити якість та ефективність виробництва мінеральних добрив.

Застосування математичного моделювання на основі двофазового підходу дозволяє проводити віртуальні експерименти та оптимізацію процесу зневоднення та гранулювання без необхідності проведення фізичних досліджень. Це збільшує швидкість розробки технологій та знижує витрати на експериментальне обладнання та матеріали.

Використання методу на основі двофазового підходу сприяє розумінню фізичних процесів, що відбуваються в псевдозрідженому шарі під час зневоднення та гранулювання. Це дозволяє покращити контроль над процесом та розробити оптимальні стратегії управління для досягнення бажаних характеристик гранул.

Саме тому, дана математична модель використовується в якості еталонної моделі при управлінні процесом виробництва мінеральних добрив.

3 СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЦТВА МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ, З НЕЧІТКИМ АДАПТИВНИМ РЕГУЛЯТОРОМ

Система управління з нечітким адаптивним регулятором (Fuzzy Adaptive Control System) є одним з методів керування, який поєднує принципи нечіткої логіки і адаптивного керування. Ця система використовує нечіткі правила та алгоритми адаптації для автоматичного регулювання процесів у реальному часі.

Основні складові системи управління з нечітким адаптивним регулятором включають:

Блок нечіткої логіки: Використовує нечіткі правила, які встановлюють зв'язок між вхідними та вихідними змінними системи. Нечіткі правила визначаються експертними знаннями або на основі досліджень. Ці правила допомагають системі приймати рішення та генерувати керуючі сигнали залежно від вхідних умов.

Адаптивний блок: Цей блок відповідає за адаптацію системи до змін у середовищі або параметрах системи. Він може використовувати алгоритми адаптації, такі як алгоритм градієнтного спуску або адаптивні нейромережі, для налаштування параметрів нечіткого регулятора залежно від поточних умов.

Блок виконавчого пристрою: Цей блок виконує регуляційні сигнали, які генеруються нечітким адаптивним регулятором. Він контролює актуатори або інші пристрої для забезпечення потрібного впливу на систему, яку необхідно керувати.

Переваги використання системи управління з нечітким адаптивним регулятором включають:

- Здатність працювати з нечіткими або невизначеними даними та знаннями.
- Здатність адаптуватись до змін у середовищі та параметрах системи без необхідності ручного переналаштування.
- Здатність працювати з нестабільними або нелінійними системами.
- Здатність досягати хороших результатів при відсутності точних математичних моделей системи.

Однак, важливо враховувати, що ефективність системи управління з нечітким адаптивним регулятором залежить від правильного визначення нечітких правил,

адаптивних алгоритмів та налаштування параметрів. Для досягнення оптимальних результатів може бути необхідним експертне знання та досвід.

3.1 Нечіткий адаптивний регулятор

Нечіткий адаптивний регулятор є одним з методів управління, який поєднує нечітку логіку та адаптивність для досягнення кращої процесу контролю і регулювання.

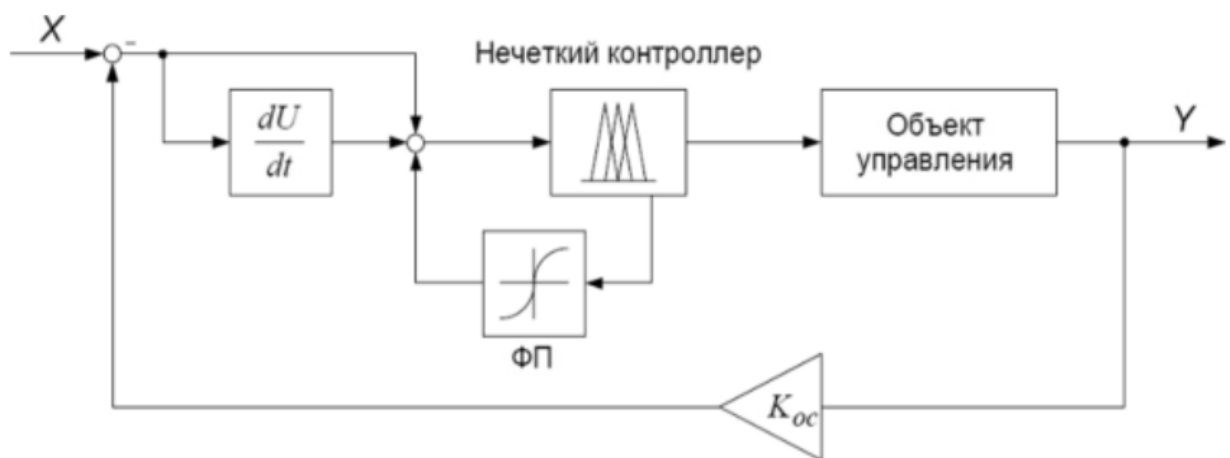


Рисунок 3.1 — Приклад структурної схеми нечіткого адаптивного регулятора

Основна ідея застосування нечіткого адаптивного регулятора полягає в тому, що він використовує нечіткі правила та алгоритми для адаптації параметрів регулятора на основі зовнішніх умов та входних сигналів.

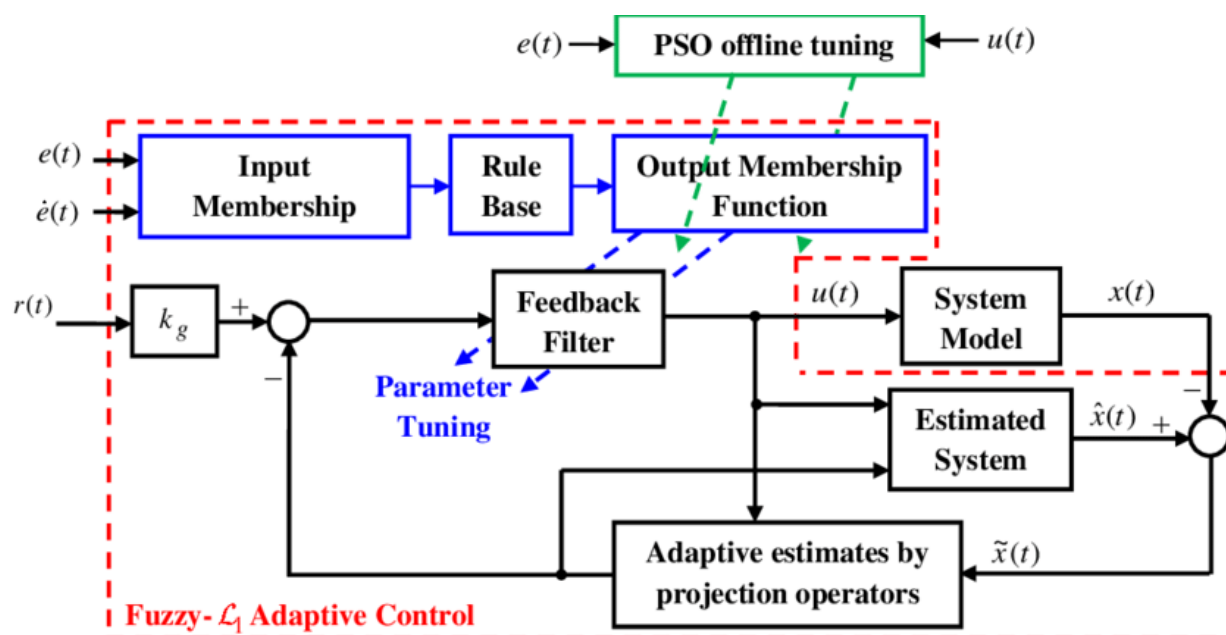


Рисунок 3.2 — Приклад роботи нечіткого адаптивного регулятора

Особливості використання нечіткого адаптивного регулятора включають:

Гнучкість: Нечіткі адаптивні регулятори можуть бути легко налаштовані та адаптовані до змінних умов та вхідних сигналів. Вони можуть адаптуватися до змін в системі та самооптимізуватися для досягнення оптимальних результатів.

Робастність: Нечіткі адаптивні регулятори добре справляються зі збуреннями, шумом та невизначеністю в системі. Вони можуть враховувати нечіткість та випадковість вхідних сигналів та адаптуватися до них для стабільного та точного управління.

Врахування експертного знання: Нечіткі адаптивні регулятори можуть використовувати експертне знання про систему та взаємозв'язки між вхідними та вихідними змінними. Це дозволяє покращити якість регулювання та забезпечити більш ефективне управління.

Простота в реалізації: Нечіткі адаптивні регулятори можуть бути реалізовані з використанням стандартних методів та інструментів. Вони не вимагають складних обчислень або великої обчислювальної потужності.

Застосування нечіткого адаптивного регулятора у виробництві мінеральних добрив може допомогти поліпшити контроль та регулювання процесів, таких як зневоднення, гранулювання, теплопередача та інші. Він може забезпечити кращу

стабільність, точність та ефективність виробничих процесів, що призводить до підвищення якості продукції та зниження витрат.

При виробництві мінеральних добрив нечіткі адаптивні регулятори можуть бути застосовані для поліпшення керування технологічними процесами та оптимізації виробничих параметрів. Ось кілька прикладів застосування нечітких адаптивних регуляторів у цій галузі:

Керування процесом зневоднення: Нечіткі адаптивні регулятори можуть бути використані для керування процесом зневоднення, де важливо забезпечити оптимальний рівень вологості у сировині та виробленому добриві. Регулятор може адаптувати параметри процесу, такі як температура, швидкість повітряного потоку, час зневоднення тощо, для досягнення необхідного рівня вологості.

Керування процесом гранулювання: Гранулювання є важливим етапом у виробництві мінеральних добрив, і нечіткі адаптивні регулятори можуть бути використані для керування цим процесом. Регулятор може контролювати різні параметри, такі як розмір гранул, вологості, тиск, швидкість подачі сировини тощо, забезпечуючи високу якість та однорідність готового продукту.

Оптимізація витрат енергії: Нечіткі адаптивні регулятори можуть бути використані для оптимізації витрат енергії у процесі виробництва мінеральних добрив. Вони можуть контролювати режими роботи обладнання, розподіл енергії, температури та інші фактори, що впливають на енергоефективність процесу.

Контроль якості продукції: Нечіткі адаптивні регулятори можуть бути використані для контролю якості мінеральних добрив. Вони можуть аналізувати параметри процесу, такі як вологості, розмір гранул, хімічний склад тощо, і вносити необхідні корекції для забезпечення високої якості продукції.

Автоматизація та інтеграція систем: Нечіткі адаптивні регулятори можуть бути використані для автоматизації та інтеграції різних систем, що застосовуються у виробництві мінеральних добрив. Вони можуть допомагати управляти технологічними процесами, моніторити та контролювати роботу обладнання, сприяти ефективному використанню ресурсів та підвищенню продуктивності.

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Система управління з нечітким адаптивним регулятором

Система управління з нечітким адаптивним регулятором може бути застосована при виробництві мінеральних добрив для керування та оптимізації різних процесів. Нижче наведено приклади застосування такої системи управління в цій галузі:

Контроль хімічних процесів: Виробництво мінеральних добрив зазвичай включає хімічні реакції та процеси синтезу. Система управління з нечітким адаптивним регулятором може використовуватись для контролю реакційних параметрів, таких як температура, концентрація реагентів, рівень рН тощо. За допомогою нечітких правил та алгоритмів адаптації, система може регулювати ці параметри для досягнення оптимальних умов синтезу добрив та підтримувати стабільну якість продукції.

Оптимізація процесів гранулювання: Гранулювання є важливим етапом виробництва мінеральних добрив, де сипкий матеріал перетворюється в гранули. Система управління з нечітким адаптивним регулятором може використовуватись для керування параметрами грануляції, такими як вологість, температура, розмір гранул, швидкість подачі сировини тощо. Це допомагає досягти бажаних характеристик гранул та покращити якість продукту.

Керування процесом упакування: Після виготовлення мінеральні добрива можуть бути упаковані в пакети або контейнери. Система управління з нечітким адаптивним регулятором може використовуватись для керування процесом упакування, наприклад, контролювати швидкість упакування, оптимізувати кількість добрив у кожному пакеті, контролювати якість запайки або заповнення тощо.

Моніторинг та діагностика: Система управління з нечітким адаптивним регулятором може також використовуватись для моніторингу та діагностики різних параметрів та компонентів в процесі виробництва мінеральних добрив. За допомогою нечітких правил та алгоритмів адаптації, система може виявляти аномалії, відхилення від норми та надавати рекомендації щодо корекції параметрів для забезпечення стабільності та якості процесу виробництва.

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Застосування системи управління з нечітким адаптивним регулятором в виробництві мінеральних добрив може допомогти досягти кращої якості продукції, знизити витрати та підвищити ефективність процесів. Втілення такої системи вимагає адекватного аналізу та моделювання процесів виробництва, розробки нечітких правил та алгоритмів адаптації, а також налагодження та оптимізації системи в реальному часі.

3.3 Розробка нечіткого адаптивного регулятора

Процес розробки нечіткого адаптивного регулятора включає наступні кроки:

Визначення системи: Першим кроком є визначення системи, яку необхідно керувати. В нашому випадку це система управління виробництвом мінеральних добрив, описана у розділі [2].

Моделювання системи: Наступним кроком є побудова математичної моделі системи. Ця модель описує залежності між вхідними і вихідними параметрами системи.

Визначення нечітких правил: Визначення нечітких правил є важливим кроком у розробці нечіткого адаптивного регулятора. Ці правила використовуються для прийняття рішень на основі вхідних параметрів системи. Кожне правило складається з двох основних частин: антецедента і консеквента.

Антецедент визначає умови, за яких правило стає активним. Він складається з умовних заявлень, що описують стани вхідних параметрів системи. Наприклад, "Якщо температура низька і концентрація висока, то...".

Консеквент визначає дії, які виконуються, коли правило активне. Він включає в себе визначення вихідних змінних або керуючих сигналів, які потрібно згенерувати. Наприклад, "Якщо температура низька і концентрація висока, то збільшити подачу реагенту А".

Визначення нечітких правил зазвичай виконується експертами в галузі, які мають глибокі знання про систему і процеси, що контролюються. Вони

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

використовують свій досвід і експертні знання для визначення оптимальних правил, які враховують особливості системи та бажані результати.

Кількість і складність нечітких правил може варіюватись в залежності від складності системи та кількості вхідних параметрів. Оптимальний набір правил може бути встановлений шляхом експериментального дослідження та налаштування регулятора.

У процесі роботи регулятора виконується логічне порівняння вхідних значень з умовами антецедента правил, і в результаті активні правила впливають на генерацію вихідних значень або керуючих сигналів. Цей процес повторюється на кожному кроці для прийняття рішень і керування системою.

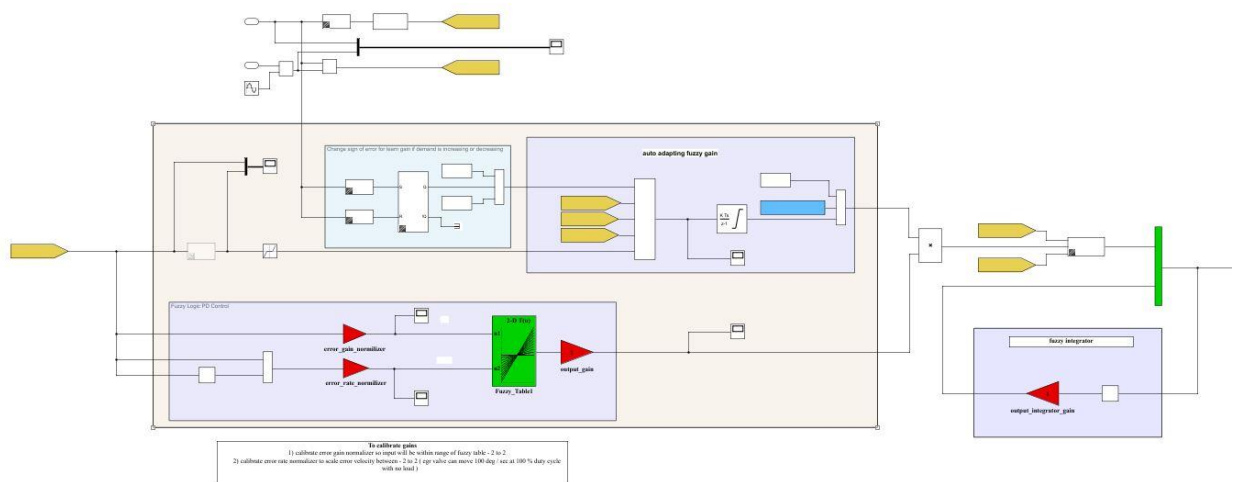


Рисунок 3.3 — Реалізація нечіткого адаптивного регулятора в системі Matlab

Використання нечітких правил у нечіткому адаптивному регуляторі дозволяє системі адаптуватись до змінних умов і забезпечувати оптимальне управління процесом виробництва мінеральних добрив.

Визначення нечітких множин: Нечіткі множини в контексті регулятора використовуються для моделювання нечітких змінних, таких як "малий", "середній" або "великий", які відображають ступінь важливості або величину певної характеристики системи.

Визначення нечітких множин в регуляторі включає в себе визначення термів і функцій приналежності. Терми визначаються як лінгвістичні етикетки, що

описують діапазон значень змінної. Функції приналежності визначають ступінь належності кожного значення змінної до терму. Функції приналежності можуть бути трикутними, трапецевидними, гауссовими або іншими формами, в залежності від контексту та потреб системи управління.

Прийняття рішень в регуляторі здійснюється шляхом застосування нечітких правил, які встановлюють зв'язок між вхідними змінними та вихідними діями регулятора. Ці правила визначаються на основі експертних знань і досвіду в області управління системою. Застосовуються алгоритми нечіткої інференції для обчислення відповідних вихідних дій регулятора на основі вхідних змінних і правил.

Таким чином, використання нечітких множин і правил у регуляторі дозволяє враховувати нечіткість та неоднозначність в управлінні системою і забезпечує більш гнучкий та адаптивний підхід до прийняття рішень. Визначення правил інтерференції: Наступним кроком є визначення правил інтерференції, які використовуються для обчислення вихідних значень на основі вхідних параметрів та нечітких правил. Це може включати застосування логічних операцій, таких як "і" і "або", а також методів нечіткої логіки, таких як активація і агрегація.

Адаптація системи: Для забезпечення адаптивності нечіткого регулятора використовуються різні методи адаптації. Основна мета методів адаптації полягає у зміні параметрів регулятора в процесі роботи для досягнення кращої продуктивності і відповідності потребам системи. Основними методами адаптації можна виділити наступні:

Метод градієнтного спуску: Цей метод використовує градієнтну інформацію про функцію втрат (яка визначається на основі помилки регулювання) для оновлення параметрів регулятора. Градієнтний спуск дозволяє знаходити оптимальні значення параметрів шляхом пошуку мінімуму функції втрат.

Генетичні алгоритми: Цей метод базується на ідеї еволюції, де випадково створюються початкові набори параметрів регулятора, а потім проводиться пошук найкращих комбінацій параметрів шляхом відбору, схрещування і мутації. Цей

процес повторюється протягом декількох поколінь з метою покращення продуктивності регулятора.

Методи навчання з підкріпленням: Ці методи базуються на принципі нагороди і покарання. Регулятор отримує зворотний зв'язок про продуктивність системи і на основі цього зворотного зв'язку вносить зміни в свої параметри. Цей процес відбувається ітеративно, дозволяючи регулятору "навчитися" оптимальним стратегіям управління.

Метод адаптації за допомогою спостережень: Цей метод базується на аналізі спостережень про стан системи та використанні їх для оновлення параметрів регулятора. Використовуються різні алгоритми, такі як алгоритм Левенберга-Марквардта, алгоритм Ньютона та інші, для оптимізації параметрів регулятора на основі спостережень.

Ці методи адаптації можуть використовуватися окремо або комбіновано для досягнення кращої адаптивності регулятора в залежності від конкретних вимог та особливостей системи управління.

Налаштування параметрів: Останнім кроком є налаштування параметрів регулятора для досягнення бажаних результатів. Це може включати експериментальні дослідження, ітеративний процес налаштування та аналіз результатів.

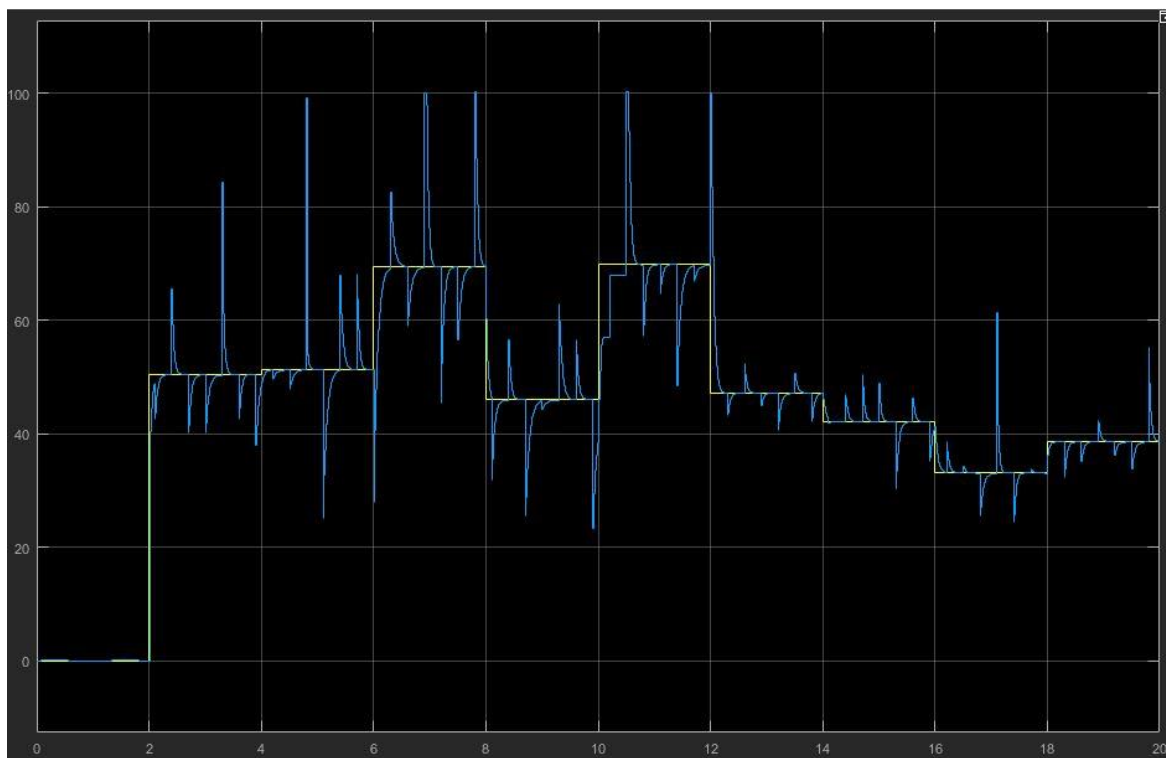


Рисунок 3.4 — Результат отриманий при симуляції роботи нечіткого адаптивного регулятора в Matlab

Висновки

Використання нечіткого адаптивного регулятора у системі управління може допомогти покращити ефективність та точність процесів виробництва мінеральних добрив. Крім того, також можна виділити наступні переваги у використанні нечіткого адаптивного регулятора у системі управління виробництвом мінеральних добрив:

Гнучкість і адаптивність: Нечіткі адаптивні регулятори можуть змінювати свої параметри та структуру в реальному часі залежно від змінних умов і потреб системи. Це дозволяє їм адаптуватися до змін у середовищі та забезпечувати оптимальне управління навіть у змінних умовах.

Толерантність до нечіткості та шуму: Нечіткі адаптивні регулятори володіють здатністю працювати з нечіткими, неточними або неструктурованими даними, що робить їх ефективними при роботі з реальними системами, де інформація може

бути неповна або неоднозначна. Вони також можуть забезпечувати стійкість до шумів і вимірювальних помилок.

Експертна інформація: Нечіткі адаптивні регулятори можуть використовувати експертні знання та досвід у процесі прийняття рішень. Це дозволяє враховувати не тільки математичні моделі системи, але й інтуїтивне розуміння фахівців і здійснювати управління на основі цих знань.

Робастність: Нечіткі адаптивні регулятори зазвичай є робастними до змін у системі і здатними працювати стабільно навіть при наявності випадкових або непередбачуваних збурень. Вони можуть компенсувати помилки або відхилення, що дозволяє забезпечити стійке і надійне управління системою.

Простота використання і настройки: Нечіткі адаптивні регулятори можуть бути відносно простими в налаштуванні і використанні. Вони не вимагають точних математичних моделей системи і можуть працювати на основі емпіричних даних або експертних знань. Це дозволяє швидко впроваджувати їх у практичних застосуваннях.

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		55

ВИСНОВКИ

У цьому дипломному проєкті було розглянуто питання удосконалення системи управління виробництвом мінеральних добрив. Оскільки аграрний сектор займає значну частину української економіки, а мінеральні добрива, у свою чергу, є невід’ємною складовою сільського господарства, дана тема є досить актуальною. Розглядаючи питання удосконалення системи управління виробництвом мінеральних добрив більш детально, слід зазначити, що на основі розвитку інформаційних технологій оптимального управління розроблено теоретичні засади підвищення ефективності процесів виробництва мінеральних добрив. Додатково було запропоновано, розглянуто та використано новий метод виробництва, із залученням нечіткого адаптивного регулятора, який має змогу адаптувати свої параметри та правила на основі вхідних даних та зворотного зв’язку з системи, що дозволяє оптимізувати роботу системи управління. Крім вищезгаданих переваг, нечіткий адаптивний регулятор може значно підвищити продуктивність системи завдяки забезпеченню стабільності функціональних процесів.

Більш детально, роботу над дипломним проєктом можна описати наступним чином:

1. Проаналізовано процес виробництва мінеральних добрив, із залученням інформаційних технологій, що сприяють автоматизації виробництва. Що, у свою чергу, дає змогу уникнути перевиробництва або недовиробництва, оптимізувати використання ресурсів та покращити якість виробництва. Також були розглянуті основні математичні моделі, що використовуються при виробництві мінеральних добрив, та найефективніші системи управління.
2. Розглянутий метод математичного моделювання процесів зневоднення і гранулювання у псевдозрідженому шарі при виробництві мінеральних

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		56

добрив, на основі двохфазного підходу. Додатково розроблена еталонна математична модель, з урахуванням, та детальним описом її особливостей.

3. Розроблено систему управління з нечітким адаптивним регулятором. Створені структурна та функціональні схеми системи управління виробництвом мінеральних добрив. А також діаграми використання системи, та діаграма її діяльності, що дає змогу оцінити структуру та функціональну можливість системи управління виробництвом мінеральних добрив.

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		57

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Корнієнко Б.Я. Інформаційна технологія оптимального управління виробництвом мінеральних добрив // Автоматика, 2014. – 263 с.
2. Werther, J. Mathematical Modeling of Fluidized Bed Reactors, Int. Chem. Eng., 1980. – 541 с.
3. N.G. Deen, W. Godlieb, S. Gorter, J.A.M. Kuipers Numerical Analysis of Solids Mixing in Pressurized Fluidized Beds Ind. Eng. Chem. Res., 2010. – 5253 с.
4. Кузнецов Д.В. Информационные технологии в управлении предприятием. – «Три Квадрата», 2005. – 158 с.
5. Автоматизация управления предприятием / В.В. Баронов, Г.Н. Калянов, Ю.И. Попов и др. – М.: ИНФРА-М, 2000. – 239 с.
6. Ляшко С.І. Лагранжово-ейлеровий підхід до розв'язання оберненої задачі конвективної дифузії /Ляшко С.І., Ключин Д.А., Семенов В.В., Шевченко К.В./ Доповіді НАН України, 2007. – 43 с.
7. Gidaspow D. Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach / D. Gidaspow, R. Bezburuah, J. Ding // In Fluidization VII. The 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization : Proceed, 1992. – 82 с.
8. Корнієнко Б.Я. Математична модель двохфазного потоку процесів зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі // Автоматика – 2011: Матеріали 18-ї Міжнародної конференції з автоматичного управління. Львів, 28 - 30 вересня, 2011 р. – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2011. – 286 с.
9. 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. – 19 с.
10. Корнієнко Б.Я. Двохфазна модель процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Серія «Хімічна інженерія,

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						58
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

екологіята ресурсозбереження», 2012. – 35 с.

11. Корнієнко Б.Я. Гранулювання у псевдозрідженому шарі. Дослідження детермінованого хаосу процесу / Корнієнко Б.Я., Ладієва Л.Р., Снігур О.В. / Хімічна промисловість України, 2013. – 23 с.
12. Корнієнко Б.Я. Інформаційні технології оптимального управління виробництвом мінеральних добрив / Б.Я. Корнієнко – К.: Вид-во Аграр Медіа Груп, 2014. – 288 с.
13. Корнієнко Б.Я. До питання ідентифікації процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі // Автоматика – 2005:Матеріали 12-ї Міжнародної конференції з управління. Харків, 30 травня – 3 червня 2005 р. –Х.: Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2005. – 67 с.
14. Волошин М. Д. Т38 Технологія неорганічних речовин. Частина 3. Мінеральні добрива: навчальний посібник / М. Д. Волошин, Я. М. Черненко, А. В. Іванченко, М. А. Олійник. — Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2016. – 29 с.
15. 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. – 200 с.
16. Корнієнко Б.Я. Кінетика процесу гранулоутворення органо-мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі при збільшенні об'єму зони диспергування документообігу / Я.М. Корнієнко, А.Р. Степанюк, П.М. Магазій, Б.Я. Корнієнко // Науково-технічний журнал «Екологія довкілля та безпека життєдіяльності», 2007. – 65 с.
17. Корнієнко Б.Я. Кінетика процесу гранулоутворення комплексних мінерально-гумінових добрив / Я.М. Корнієнко, А.Р. Степанюк, П.М. Магазій, Заграй Я.М., Б.Я. Корнієнко // Науково-технічний журнал «Екологія довкілля та безпека життєдіяльності», 2007. – 78 с.
18. Корнієнко Б.Я. Дослідження детермінованого хаосу процесу гранулювання у виробництві органо-мінеральних добрив /Л.Р. Ладієва, Б.Я. Корнієнко, О.В. Снігур/ Автоматика – 2008:Тези доповідей 15-ї Міжнародної конференції з

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

автоматичного управління. Одеса, 23–26 вересня 2008 р. – О.: Одеська національна морська академія, 2008. – 832 с.

19. Корнієнко Б.Я. Оптимізація процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі / Б.Я. Корнієнко, Л.Р. Ладієва, І.Ф. Хрустальов // Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI'2012): Матеріали міжнародної наукової конференції 27–31 травня 2012, 2012. – 90 с.
20. Wen C.-Y. Mechanics of Fluidization / C.-Y. Wen, Y. H. Yu // Chem. Eng. Prog. Symp. Series, 1966. – 111 с.
21. 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. – 31 с.
22. Корнієнко Б.Я. Мінеральні добрива. Статична оптимізація процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі // Хімічна промисловість України, 2013. – 40 с.
23. Gidaspow D. Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach / D. Gidaspow, R. Bezburuah, J. Ding // In Fluidization VII. The 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization : Proceed, 1992. – 82 с.
24. Загальні відомості про мінеральні добрива. URL:
<https://naurok.com.ua/prezentaciya-mineralni-dobryva-147433.html>
25. Технологія солей та добрив. 10.1. Мінеральні добрива та їх класифікація. URL:
<https://kc.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/11/2021/02/Lecture-9.pdf>
26. Математичні моделі: означення, характеристики, етапи побудови. URL:
https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/firen/3zlepko_osnovy_biomedychnogo_radioelektroonogo_aparatobuduvannya/6.html
27. Адаптивный нечеткий регулятор. URL:
https://studref.com/548940/tehnika/adaptivnyy_nechetkiy_regulyator

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

28. Development of the Adaptive Fuzzy Control System for a Parallel-Flow Drying Drum. URL:

https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2021/64/e3sconf_suse2021_01024/e3sconf_suse2021_01024.html

					ІА92.140БАК.004 ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		