

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра "Автоматизації виробничих процесів"

"Допущено до захисту"

Зав.кафедрою АВП

к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Дідик О.К.

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025р.

**ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**за другим (магістерським) рівнем вищої освіти**

на тему

**" Автоматизована система керування технологічним процесом виготовлення мінеральних добрив "**

**" Automated control system for the technological process of mineral fertilizer production "**

Виконав здобувач вищої освіти II курсу  
групи АК-24 М (1,4)

174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

\_\_\_\_\_ Сугак О.С.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Керівник роботи

к.т.н, професор

\_\_\_\_\_ Каліч В.М.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Рецензент

\_\_\_\_\_

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

# ЗМІСТ

ВСТУП.....	
1 Призначення та область застосування автоматизованої системи виготовлення мінеральних добрив.....	
1.1 Загальна характеристика мінеральних добрив.....	
1.2 Характеристика процесу зневоднення та гранулювання.....	
1.3 Тепло-масообмін і режими гранулювання.....	
1.4 Конструкція апаратів гранулювання.....	
2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови автоматизованої системи виготовлення мінеральних добрив.....	
2.1 Системи зневоднення та гранулювання.....	
2.2 Основні технологічні параметри процесу виготовлення мінеральних добрив.....	
2.3 Аналіз апарату виготовлення мінеральних добрив як об'єкта керування та вибір принципу побудови системи керування.....	
3 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень автоматизованої системи виготовлення мінеральних добрив.....	
3.1 Розробка та опис функціональної схеми автоматизованої системи виготовлення мінеральних добрив.....	
3.2 Вибір датчика температури.....	
3.3 Розробка принципової схеми.....	
4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність виробу.....	
4.1 Аналіз впливу частоти обертання ротора на ККД агрегату.....	
4.2 Визначення математичної моделі керованого об'єкта.....	
4.2.1 Ідентифікація оператора струм-температура.....	
4.3 Синтез автоматизованої системи виготовлення мінеральних добрив.....	
Висновок.....	
Література.....	
Додаток А. Охорона праці.....	

## ВСТУП

Автоматизація є однією з провідних галузей сучасної науки і техніки, яка розвивається надзвичайно швидко та проникає у різні сфери людської діяльності. Вона суттєво змінює характер праці, трансформуючи роль робітників у виробничих процесах. У цехах з автоматизованим обладнанням ключову роль виконують фахівці нової формації – оператори, програмісти та працівники інших професій, які раніше не існували. Автоматизація технологічних процесів є важливим чинником підвищення продуктивності, забезпечення безпечних умов праці та оптимізації виробничих процесів.

Сучасні проекти в галузях нафтопереробки, хімії та нафтохімії, виробництва мінеральних добрив, енергетики та інших передбачають комплексну автоматизацію технологічних процесів для досягнення високої ефективності. Впровадження автоматизації зменшує обсяг важкої фізичної праці, збільшує продуктивність і відкриває новий етап машинної праці, коли людина звільняється від безпосередньої участі у виробництві.

Контроль та управління технологічними процесами передаються автоматизованим установкам, що сприяє підвищенню ефективності роботи виробництва, зниженню собівартості продукції та стабільному забезпеченню якості виготовлених матеріалів. В результаті автоматизація стає не лише засобом оптимізації виробничих процесів, а й важливим чинником модернізації трудових відносин і розвитку нових професійних компетенцій персоналу.

Автоматизація керування технологічними процесами на різних виробництвах дозволяє досягати високої продуктивності при мінімальних витратах та забезпечує високу якість продукції. Проте ефективність систем автоматичного регулювання значно знижується, якщо їх розробляти лише на основі загальних теоретичних положень без урахування конкретних умов виробництва. Для максимальної продуктивності такі системи повинні проектуватися з урахуванням специфіки технологічних процесів, на які вони орієнтовані.

Незважаючи на важливість загальних принципів побудови систем автоматичного регулювання та математичного опису процесів, самі по собі вони не забезпечують практичної цінності. Справжня ефективність систем досягається лише при інтеграції характеристик конкретного технологічного процесу, що дозволяє оптимізувати хід виробничих операцій та забезпечити стабільність і якість кінцевого продукту.

У сучасних умовах зростання світового споживання продукції різних промислових галузей та загострення екологічної ситуації постає нагальна потреба у раціональному використанні енергетичних і сировинних ресурсів у виробництві з метою отримання максимальної кількості продукції визначеної якості. Одним із ключових факторів при цьому є забезпечення стабільності хіміко-технологічних процесів.

Ефективне автоматичне регулювання неможливе без глибокого розуміння технології виробництва та вимог, що висувуються до процесів. Чітке знання параметрів і режимів дозволяє розробити надійну систему керування, яка забезпечує точність і стабільність виконання технологічних операцій.

Для хімічної промисловості особливо важливим є зменшення залучення персоналу до безпосереднього обслуговування технологічного обладнання, що сприяє підвищенню безпеки та значному покращенню умов праці робітників у технологічних цехах. Такий підхід дозволяє поєднати ефективність виробництва з охороною праці та мінімізацією ризиків аварійних ситуацій.

Автоматизація забезпечує не лише прямий економічний ефект, а й істотно підвищує загальний технічний рівень хімічної промисловості. Використання систем автоматичного управління дозволяє підтримувати точний заданий режим роботи, що сприяє інтенсифікації технологічних процесів за рахунок застосування активніших каталізаторів, підвищених температур і тиску.

В даній випускній кваліфікаційній роботі розглядаються питання автоматизації виробництва мінеральних добрив, зокрема гранульованого сульфату амонію. Використання таких добрив при внесенні у ґрунт підвищує врожайність сільськогосподарських культур у 1,5-2 рази. Крім того, застосування добрив покращує якість продукції: збільшується вміст білка та клейковини в зерні, зростає кількість цукру в буряку, крохмалю в картоплі та інших продуктах. Добрива також підвищують стійкість рослин до несприятливих погодних умов, таких як засуха чи заморозки.

На сьогодні практично всі мінеральні добрива виготовляються у гранульованій формі. Гранули діаметром від 2 до 10мм мають високу механічну міцність: вони не руйнуються під час транспортування, не злежуються та можуть висіватися звичайними сівалками, що спрощує логістику і підвищує ефективність аграрних технологій.

Тема даної роботи є особливо актуальною, оскільки спрямована на розв'язання задачі визначення стійких умов процесу зневоднення та грануляції гетерогенних систем у псевдозрідженому шарі за зміни ключових параметрів. Реалізація цього підходу дозволяє підвищити якість отриманого гранульованого продукту шляхом оптимізації та стабілізації роботи технологічного обладнання.

Розрахунки та моделювання в рамках досліджень виконувалися на сучасних персональних комп'ютерах із застосуванням спеціалізованих прикладних програмних пакетів, що забезпечує високу точність і ефективність обчислень та дозволяє проводити комплексний аналіз впливу технологічних параметрів на результати процесу.

# **1 Призначення та область застосування автоматизованої системи виготовлення мінеральних добрив**

## **1.1. Загальна характеристика мінеральних добрив**

Ріст і розвиток рослин потребують наявності різноманітних поживних речовин у формах, доступних для засвоєння. Основними життєво необхідними елементами є азот, фосфор, калій та певні мікроелементи, які вводяться у ґрунт у малих кількостях (бор, мідь, молібден, марганець, цинк та інші).

Мінеральні солі, що містять азот, фосфор і калій, здебільшого перебувають у ґрунті в формах, не придатних для прямого засвоєння рослинами, тому їх вводять у вигляді спеціальних азотних, фосфорних і калійних добрив.

Азот (N) є складовою органічних сполук, що формують основу живих організмів – білків, і водночас входить до складу хлорофілу, завдяки якому рослини поглинають енергію сонця та перетворюють її на хімічну енергію для росту.

Фосфор (P) засвоюється рослинами й використовується для синтезу білкових сполук, що містять фосфор; він підвищує морозостійкість культур та покращує якість і збереження урожаю.

Калій (K) відіграє важливу роль у формуванні вуглеводів, зокрема цукрів і крохмалю, необхідних для розвитку рослин.

Оскільки під час збору врожаю ці поживні елементи вилучаються з ґрунту, їх концентрація може стати недостатньою для забезпечення високої продуктивності. Найчастіше це стосується азоту, фосфору та калію. Таким чином, для підтримання родючості ґрунту та підвищення врожайності необхідно поповнювати запаси живильних речовин шляхом внесення добрив.

Добрива поділяють на прямі, призначені безпосередньо для живлення рослин, та непрямі, які впливають на фізико-хімічні властивості ґрунту,

зокрема його реакцію (рН) і структуру. Прямі добрива включають органічні (гній, торф, компости), мінеральні або туки (азотні, фосфорні, калійні, а також мікродобрива з необхідними мікроелементами) та бактеріальні добрива, що містять корисні мікроорганізми.

Непрямі добрива застосовують для нейтралізації кислотності ґрунту шляхом внесення тонко подрібненого вапняку, крейди або доломіту, що поліпшує структуру ґрунту і створює оптимальні умови для розвитку рослин.

У складі органічних добрив живильні елементи переважно містяться у вигляді органічних речовин, тому вони відносяться до комплексних добрив. Найпоширенішими та найціннішими серед них є гній і торф, які забезпечують рослини поживними речовинами та поліпшують фізичні властивості ґрунту.

Мінеральні добрива за хімічним складом поділяються на прості та комплексні. Простими, або односторонніми, є ті, що містять лише один живильний елемент: азотні (аміачна селітра, сульфат амонію, карбамід), фосфорні (простий і подвійний суперфосфат, фосфоритна мука) та калійні (хлористий калій, сульфат калію, каїніт).

Комплексні, або багатоконпонентні, добрива містять не менше двох поживних речовин. Залежно від способу виробництва їх поділяють на складні та змішані, які випускають у твердому або рідкому вигляді, що дозволяє ефективно задовольняти потреби рослин у поживних елементах та підвищувати родючість ґрунту.

Основною особливістю комплексних добрив є те, що кожна гранула містить кілька поживних елементів, а виготовляють їх у межах одного технологічного циклу.

На відміну від них, змішані добрива формуються шляхом поєднання готових однокомпонентних добрив – фосфору, азоту та калію. Такі добрива поділяють на три основні типи:

1. порошкоподібні змішані добрива або тукосуміші, що утворюються механічним перемішуванням простих порошкоподібних добрив;

2. сухі гранульовані тукоsumіші, які отримують шляхом механічного змішування готових гранульованих добрив;

3. складнозмішані (хімічно змішані) гранульовані добрива, що виготовляються мокрим способом – змішуванням порошкоподібних компонентів із введенням необхідних рідких реагентів, наприклад, аміакатів, кислот та інших сполук. При цьому у технологічному процесі можуть застосовуватися пара, вода або газоподібний аміак.

Промислове виробництво забезпечує широкий асортимент комплексних добрив, що відрізняються співвідношенням і вмістом поживних речовин.

Найпоширенішими мінеральними (однокомпонентними) добривами є азотні сполуки: нітрат амонію, сульфат амонію та карбамід. Ці добрива характеризуються високою розчинністю у воді, що забезпечує швидке засвоєння рослинами.

### **Сульфат амонію**

Мінеральне азотно-сірчане добриво сульфат амонію є світлою кристалічною сіллю з відтінками жовтого або рожевого кольору. Воно характеризується низькою гігроскопічністю, що запобігає злежуванню при тривалому зберіганні, дозволяючи зберігати продукт до п'яти років.

Хімічна формула добрива –  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . Чистий продукт містить 20,8 % азоту при вологості гранул, що не перевищує 0,6 %.

Отримання сульфату амонію базується на наступній хімічній реакції [1]



Розчинність  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  у воді показана на рис.1.1. В присутності аміаку розчинність сульфату амонію значно знижується.

На сьогодні промислове виробництво сульфату амонію здійснюється кількома основними технологічними способами: по-перше, із аміаку коксового газу під час виробництва капролактаму та ПХВС; по-друге, шляхом конверсії гіпсу з поступовим збільшенням частки синтетичного та регенерованого продукту.

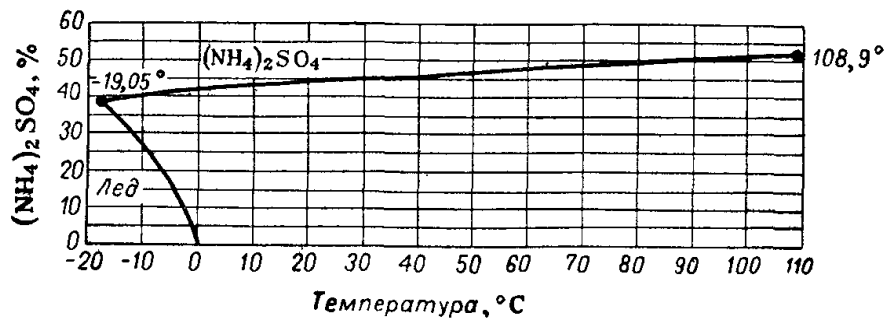


Рисунок 1.1 – Графік розчинності  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  у воді

У вітчизняній хімічній промисловості синтетичний сульфат амонію отримують двома методами: «мокрим» та «сухим».

«Мокрі» способи виробництва характеризуються рядом обмежень:

1. неможливістю отримання абсолютно сухого продукту на центрифугах, що часто потребує додаткового зневоднення кристалів у сушильних установках;

2. необхідністю суворого дотримання режиму роботи сатуратора, щоб уникнути неконтрольованого закристалізування реакційної маси як у самому апараті, так і в відповідних трубопроводах.

Ці фактори визначають складність технологічного процесу та підвищують вимоги до контролю параметрів виробництва для забезпечення стабільної якості кінцевого продукту.

3. значне застосування робочої сили.

Для виробництва сульфату амонію з синтетичного аміаку «сухим» методом застосовується класична схема Фаузера. Використання цього способу дозволяє усунути більшість недоліків традиційного «мокрого» процесу. У запропонованій схемі реакційну камеру можна замінити гранулятором киплячого шару (КШ), що забезпечує отримання гранульованого продукту. В такому випадку технологічна схема виробництва гранульованого сульфату амонію набуває вигляду, представленого на рис.1.2.

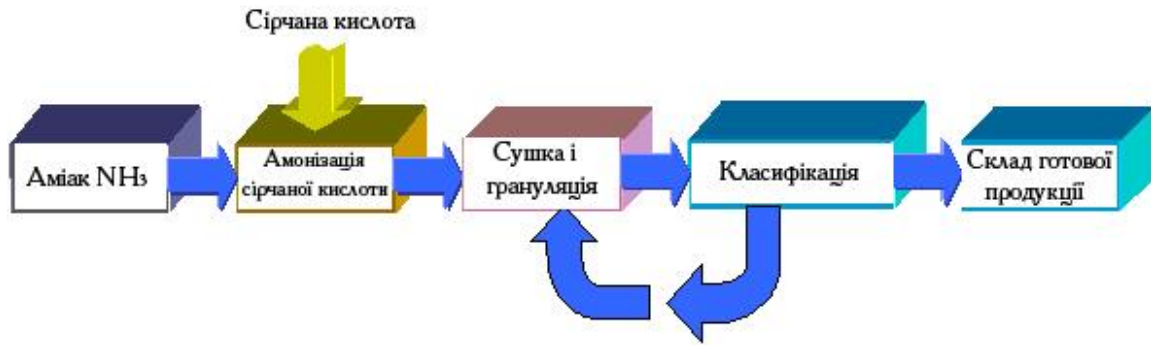


Рисунок 1.2 – Технологічна схема виробництва сульфату амонію

Основні переваги сульфату амонію порівняно з аміачною селітрою та карбамідом:

**Економічність.** Сульфат амонію завжди дешевший за інші азотні добрива. Вартість однієї тони азоту в ньому майже вдвічі нижча, ніж у селітрі або карбаміді. При розрахунку економічної ефективності варто враховувати додатковий вміст сірки – близько 24%.

**Вплив сірки на врожай.** На відміну від селітри та карбаміду, сульфат амонію містить сірку, яка безпосередньо впливає на якість майбутнього врожаю. Сірка посідає одне з перших місць серед біогенних елементів після азоту, фосфору та калію. Завдяки цьому сульфат амонію можна розглядати як комплексне добриво з живильними речовинами до 45%.

**Висока ефективність.** Сульфат амонію за результатами дії на рослини не поступається іншим азотним добривам. Особливо ефективне його застосування під зернові культури, рапс, рис, картоплю, соняшник, буряк, овочеві культури та кавуни.

**Зменшення втрат азоту та екологічна безпека.** При поверхневому внесенні сульфату амонію втрати аміаку зазвичай не перевищують 1-3%, тоді як у карбаміду та аміачної селітри вони досягають 25-30% від внесеного азоту. Це дозволяє знизити негативний вплив на навколишнє середовище та підвищити ефективність добрива.

## 1.2 Характеристика процесу зневоднення та гранулювання

Грануляція є складним гетерогенним процесом, у ході якого формуються тверді частинки (гранули) визначеного розміру з заданими фізико-механічними та хімічними властивостями. Цей процес забезпечує отримання продукту з хорошими сипучими характеристиками, високою щільністю, міцністю структури та однорідністю за розмірами [2].

Особливе значення грануляція має у виробництві мінеральних добрив, що є однією з найбільш об'ємних галузей хімічної промисловості. Гранульовані добрива відрізняються покращеними споживчими властивостями: вони не утворюють пилу, зменшують втрати під час транспортування та внесення в ґрунт, менше схильні до злежування і підвищують агрохімічну ефективність застосування.

Грануляційний процес реалізується в апараті з псевдозрідженим шаром, що дозволяє отримувати органо-мінеральні добрива у вигляді гранул діаметром 1,5–4,0 мм з рівномірним розподілом компонентів усередині гранули. Технічна особливість цього процесу полягає в одночасному проведенні зневоднення та грануляції в одній стадії, а також у стабілізації дисперсного складу частинок у псевдозрідженому шарі без додаткового введення нових центрів грануляції ззовні.

Процес зневоднення розчинів у псевдозрідженому шарі належить до інтенсивних явищ тепло- і масообміну. Застосування цього методу під час виробництва високоякісних гранульованих мінеральних добрив дозволяє суттєво підвищити продуктивність виробництва завдяки поєднанню кількох технологічних стадій у одному апараті.

Псевдозрідження – це явище, при якому зернистий матеріал під дією потоку газу або крапель рідини (зріджуючого агента) перетворюється на псевдогомогенну систему. Псевдозріджений шар (ПШ) характеризується тим, що тверді частинки всередині шару поводяться як зважені в рідині: шар у цілому набуває властивостей рідини, здатний текти, переливатися, формувати хвилі, а внутрішнє тертя практично відсутнє. Саме ці фізичні

властивості забезпечили широке використання ПШ у технологіях гранулювання.

Фізична модель грануляції розчину в ПШ включає такі основні процеси: теплообмін між частинками та газовим потоком, масообмін із випаровуванням рідини, контактну взаємодію між гранулами та формування рівномірної гранулометрії, що дозволяє отримувати продукт стабільної якості [2].

- псевдозрідження частинок гарячим теплоносієм;
- розподіл розчину на поверхні гранул;
- випаровування вологи з поверхні частинок;
- кристалізація розчину на поверхні частинок і збільшення їх розміру;
- перетирання частинок при русі в шарі;
- зміна дисперсного складу частинок в шарі за рахунок подрібнення крупних гранул (безрецикловий процес) або за рахунок введення нових центрів грануляції ззовні (рецикловий процес).

Суть методу грануляції з використанням апарату КШ полягає у розпилюванні гранульованої речовини, що знаходиться в розчині, пульпі або плаві, на частинки в ПШ. Рідка фаза подається через форсунки всередину киплячого шару або розподіляється по його поверхні після попереднього упарювання в факелі розпилювання. У деяких випадках одночасно з випаровуванням рідини відбуваються реакції нейтралізації, супроводжувані процесами кристалізації, сушіння та грануляції. Такий підхід дозволяє поєднати кілька стадій утворення гранул в одному апараті, що забезпечує значний техніко-економічний ефект і максимальне використання тепла хімічних реакцій, підвищуючи економічну ефективність процесу.

До основних характеристик гранулювання в ПШ, які застосовуються для практичних розрахунків, відносяться: гідравлічний опір шару  $\Delta P$ ; критична швидкість газового потоку  $\omega_{кр}$ , при якій шар переходить у псевдозріджений стан; швидкість витання  $\omega_{вит}$ , що відповідає винесенню

частинок з апарату; швидкості  $\omega_{п.с.р.}$  та  $\omega_{к.с.р.}$ , які визначають початок і завершення стабільної роботи процесу; а також порозність шару  $\varepsilon$ , що характеризує його структурну щільність

$$\varepsilon = \frac{V_{ш} - V_{тв}}{V_{ш}}, \quad (1.1)$$

де  $V_{ш}$ ,  $V_{тв}$  – об'єм шару та твердої фракції відповідно.

Висота ПШ також є критичною характеристикою, яка залежить від фізико-хімічних властивостей матеріалу. Для сульфату амонію вона повинна бути не менше  $h_{ш}=300\text{мм}$ , що відповідає висоті нерухомого шару. На основі цього параметра проводиться розрахунок гідродинамічних характеристик шару, зокрема визначається його гідродинамічний опір

$$\Delta P_{ш} = h_{ш} \cdot \rho_{м} \cdot g(1 - \varepsilon_0), \quad (1.2)$$

де  $\rho_{м}$  – густина матеріалу,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  – прискорення сили тяжіння,  $\text{м/с}^2$ ;  $\varepsilon_0$  – порозність нерухомого шару, приймаємо 0,4.

В загальному випадку порозність визначається

$$\varepsilon_0 = \frac{V_{ш} - V_{зм}}{V_{ш}}, \quad (1.3)$$

де  $V_{ш}$ ,  $V_{зм}$  – об'єм шару та зернистого матеріалу в шарі.

Пористість шару  $\varepsilon$  характеризує інтенсивність гідродинамічних процесів у ПШ і для ефективної грануляції не повинна перевищувати 0,7. Це забезпечує зменшення стирання великих гранул під час руху в ПШ та зниження втрат дрібних частинок, які відіграють роль центрів грануляції.

Пріоритетним параметром є рівномірність псевдозрідження по всій площині газорозподільної решітки та попередження виникнення застійних зон. Високі вимоги до гідродинаміки ПШ пояснюються використанням зріджуючого агента з температурою, що значно перевищує температуру плавлення оброблюваного матеріалу, наявністю твердих частинок із змінними розмірами (зростання гранул та їх дроблення), а також варіаціями

$$\text{Re}_{кр} = \frac{\text{Ar}}{150 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^2} + \sqrt{\frac{1.75}{\varepsilon^2}}}$$

Через це традиційні методи визначення робочої швидкості шару і швидкостей витання для «сухого» ПШ без зрошування потребують корекції при реалізації процесів грануляції та зневоднення, що враховує зміну властивостей матеріалу і динаміку його взаємодії з газовим потоком.

Існує велика кількість залежностей, що описують основні закономірності переходу нерухомого шару в псевдозріджений стан. Нижче наведено деякі з них.

Порівнявши гідравлічний опір зваженого шару з втратами тиску при русі газового потоку крізь нього, Горошко, Розенбаум та Тодос, після проведення відповідних перетворень, вивели рівняння для визначення критичної швидкості переходу шару в псевдозріджений режим [4]

$$\text{Re}_{кр} = \frac{\text{Ar}}{150 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^2} + \sqrt{\frac{1.75}{\varepsilon^2}}}, \quad (1.4)$$

де  $\text{Re}_{кр}$  – критичне значення числа Рейнольда;  $\text{Ar}$  – число Архімеда.

Існує також ряд інших залежностей  $\text{Re}_{кр}$  від  $\text{Ar}$  та  $\varepsilon$ , отримані іншими авторами [4, 5]

$$\text{Re}_{кр} = \frac{\text{Ar}}{75 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} + \sqrt{\left(75 \frac{1.75}{\varepsilon^3}\right)^2 + \frac{1.75}{\varepsilon^3}} \text{Ar}}; \quad (1.5)$$

$$\text{Re}_{кр} = \frac{\text{Ar} \cdot \varepsilon^{4.75}}{18 + 0.61 \sqrt{\text{Ar} \cdot \varepsilon^{4.75}}}; \quad \varepsilon=0,4. \quad (1.6)$$

Остання формула охоплює повний діапазон існування киплячого шару, включно з переходом до режиму витання ( $\varepsilon=1$ ).

У процесі «зрідження» шару відбувається його збільшення в об'ємі, що може бути описано рівнянням [6]

$$\varepsilon = \left( \frac{18 \text{Re} + 0.36 \text{Re}^2}{\text{Ar}} \right)^{0.21}. \quad (1.7)$$

Загальноприйнятої моделі структури ПШ в наш час не створено.

### **1.3. Тепло-масообмін і режими гранулювання**

Характер формування гранул і темп зростання частинок у ПШ значною мірою визначаються умовами тепло- та масообміну, тобто ефективністю видалення рідкої фази з гранульованого матеріалу. Під час гранулювання краплі рідини контактують із сушильним агентом, обмінюються теплом із окремими гранулами та поступово перетворюються на тверді частинки.

Дослідження теплообміну між рідиною та гранулою проведено в роботі [7], де розраховано випаровування плівки розчину, що повністю покриває гранулу, за умов суміщеного теплопідведення: кондукцією від самої гранули та конвекцією від псевдозріджувального агента. Товщину плівки рекомендується визначати експериментально шляхом занурення гранул у розчин. Спрощене вирішення задачі теплообміну кулі з середовищем постійної температури дозволило отримати критерійну залежність, яка показує, що 60-70% тепла на випаровування надходить від розігрітих гранул.

Враховуючи, що крапля рідини не розтікається миттєво по поверхні гранули, необхідно розглядати нестационарний процес розтікання випаровуваної плівки [8]. При цьому характер гранулоутворення змінюється залежно від співвідношення часу випаровування та часу розтікання краплі. При високій інтенсивності теплопідведення рідина видалається до того, як крапля встигла розтектися по гранулі. При зменшенні тепла крапля поступово розтікається, покриваючи більшу частину поверхні гранули, а при недостатньому теплопідведенні гранула залишається вологою.

Таким чином, процес формування гранул залежить не лише від швидкості видалення вологи, а й від темпу розтікання рідкої плівки, який визначається властивостями рідини та характером поверхні гранули.

Можливі варіанти взаємодії окремих крапель із гранулами показані на рис. 1.3.

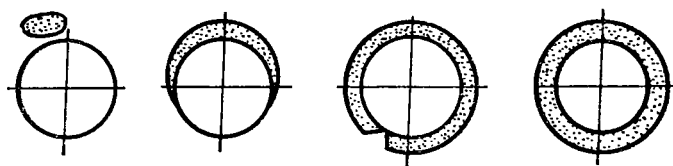


Рисунок 1.3 – Схеми взаємодії одиничних крапель і гранул

Досліджено процес випаровування крапель розчину на поверхні гранул різного розміру при зміні первинної температури гранули  $t_{gp}$  [8]. При  $t_{gp}=135^{\circ}\text{C}$  крапля трохи розтікається, нагрівається повільно та поступово випаровується, у результаті чого температура гранули знижується плавно, а максимальна різниця між початковим та поточним значенням  $\Delta t$  становить  $5^{\circ}\text{C}$ . Після завершення випаровування розчину на поверхні утворюється міцний нарост, який відтворює форму розтіклої краплі.

При  $t_{gp}=215^{\circ}\text{C}$  крапля практично не розтікається та швидко випаровується. Утворені нарости мають тонку та міцну основу з окремими виступами різноманітної форми, які легко відокремлюються. Повне випаровування краплі відбувається за короткий проміжок часу ( $\sim 15\text{c}$ ), а різниця температур  $\Delta t$  досягає  $20^{\circ}\text{C}$ , що свідчить про значне прискорення процесу випаровування при високій температурі гранули.

З підвищенням температури товщина щільної підкладки та розміри окремих наростів зменшуються. При температурі нагріву  $350^{\circ}\text{C}$  спостерігається більш інтенсивне кипіння, час випаровування складає 2–3 с, а  $\Delta t=40^{\circ}\text{C}$ . Утворена поверхня знову покрита тріщинами і прилягає до гранули ненадійно; нарости набувають вигляду пилоподібних частинок. Коли співвідношення розмірів краплі і гранули дорівнює 1:1, розчин обтікає гранулу для всіх досліджених температур. При температурі нижче  $200^{\circ}\text{C}$  формується тонка тверда плівка, а надлишок розчину стікає з поверхні гранули. Підвищення нагріву до  $350^{\circ}\text{C}$  спричиняє наростання більшої кількості речовини та формування зритої поверхні, яку легко відокремити.

Таким чином, процес гранулоутворення визначається кількістю тепла, накопиченого гранулою, тобто її теплоємністю та температурою. З ростом температури в досліджених умовах збільшення поверхні гранули сповільнюється, оскільки наростаюча речовина утворює слабкі зв'язки з основною гранулою. При контакті гранули не з розчином, а з пульпою, що має вищу температуру, відбувається кристалізація додаткової твердої фази, що знижує міцність з'єднання. Внаслідок цього виникають умови, за яких сповільнення росту гранули на поверхні може відбуватися навіть при зниженні температури самої гранули.

Розмір та форма наросту визначаються текучістю рідини, зокрема її в'язкістю, поверхневим натягненням, співвідношенням розмірів краплі і гранули, шорсткістю та змочуваністю поверхні гранули. Чим більша крапля, вища її текучість, більш гладка поверхня гранули та нижча інтенсивність видалення рідини, тим вищою є ймовірність зростання гранул на поверхні.

Варто зазначити, що ці висновки базуються на аналізі взаємодії окремих крапель з гранулами. У реальних умовах процес ускладнюється можливістю одночасного контакту гранули з кількома краплями, перенесенням частини рідини між гранулами при їх терті, обертанням гранули, впливом псевдозрідженого потоку повітря та іншими факторами. Тому знання характеру взаємодії крапель і гранул дозволяє виявити ключові чинники, що впливають на процес, але не дає повного пояснення закономірностей зростання гранул у ПШ і не дозволяє повністю описати тепло- та масообмін усього процесу.

Математичне моделювання процесу сушіння зернистих матеріалів у зваженому шарі передбачає одночасний аналіз внутрішніх процесів тепло- та масообміну всередині капілярно-пористого тіла та зовнішніх процесів обміну теплом і вологою між поверхнею вологого матеріалу і сушильним агентом. Процес видалення рідини має специфічні особливості, що зумовлені кристалізацією твердої фази під час дегідратації, що впливає на швидкість та рівномірність сушіння.

## 1.4 Конструкція апаратів гранулювання

У апаратах із ПШ гранулювання здійснюється розпилювання пульпи або розчинів на поверхню киплячих частинок. На цих частинках відкладаються тонкі плівки гранульованої речовини, які висихають та кристалізуються, поступово збільшуючи розмір гранул до необхідних параметрів. Менша частина розчину проникає всередину шару, висихає у зоні розпилювання й формує дрібні сухі частинки: одні з них видаляються газовим потоком з апарату, інші залишаються всередині як внутрішній ретур, слугуючи новими центрами гранулоутворення.

Серед основних переваг цього методу виділяють компактні розміри установки та високу продуктивність, одержання гранул сферичної форми з точним хімічним і гранулометричним складом, а також ефективну інтенсифікацію тепло- й масообміну завдяки максимальному контакту між твердими частинками зваженого шару та газовим теплоносієм. Крім того, процес легко автоматизується, що забезпечує надійне й стабільне управління роботою установки.

До основних недоліків даного методу відносяться пиловидні викиди та необхідність ретельного очищення газу, що виходить із апарату, а також нерівномірний час перебування частинок у робочому об'ємі.

Існуючі гранулятори з зваженим шаром можна класифікувати за такими ключовими технологічними та конструктивними ознаками:

1. За періодичністю роботи: періодичні та безперервні;
  - 1) За концентрацією гранульованої рідкої фази (розчин, пульпа, суспензія): слабкоконцентровані (великий вміст вологи) та висококонцентровані (низький відсоток вологи);
  - 2) За способом підведення тепла: конвективні та конвективно-кондуктивні;
  - 3) За формою корпусу: циліндричні, конічні, циліндро-конічні, прямокутні та квадратні;
  - 4) За кількістю секцій: односекційні та багатосекційні;

- 5) За зміною перетину по висоті апарату: з постійним перетином та з змінним;
- б) За місцем подачі рідкої фази через форсунки: зверху, збоку, знизу або комбіновано;
- 7) За типом сушильного агента: на повітрі, димових газах, інертних газах або перегрітій водяній парі.

Такий підхід до класифікації дозволяє систематизувати різні конструкції грануляторів і оцінити їх відповідність технологічним вимогам для конкретного виробничого процесу.

Станом на сьогодні вітчизняна та зарубіжна промисловість розробили та впровадили кілька перспективних типів грануляторів із (КШ), які відрізняються передусім схемами подачі рідкої фази через розпилювальні пристрої. Основні варіанти конструкцій грануляторів КШ наведені на рис.1.4.

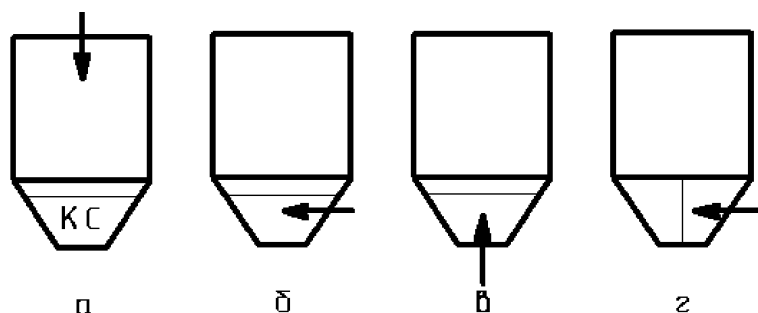


Рисунок 1.4 – Схеми грануляторів киплячого шару:

- а – з верхнім розпилюванням; б – розпилювання збоку;  
в- розпилювання знизу; г – багато секційний.

За гідродинамічними ознаками апарати поділяються на циліндричні, конічні і фонтануючі (рис.1.5).

Циліндро-конічні апарати можуть мати круглий перетин або прямокутний, якщо перетин апарата у формі усіченої піраміди з меншою основою внизу. Перевага надається апаратам круглого перетину через меншу кількість зон застоювання, однак для зручного розташування декількох

розпилювачів на площі решітки іноді використовують апарати прямокутної форми.

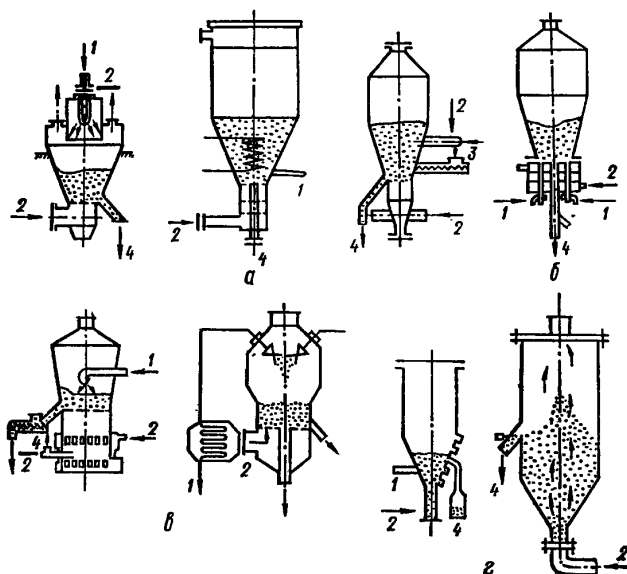


Рисунок 1.5 – Типи установок для зневоднення та грануляції розчинів в псевдозрідженому шарі:

- а – конічні апарати КШ; б – апарат КШ з локальним фонтануванням;  
 в – циліндричні апарати КШ; г – апарати КШ з фонтануючим шаром;  
 1 – розчин; 2 – теплоносій; 3 – ретур; 4 – готовий продукт

У полідисперсній системі зернистого матеріалу кожна фракція частинок має власну швидкість початку псевдозрідження та віднесення. В циліндричних апаратах швидкість руху псевдозрідженого агента практично однакова по всій висоті, що призводить до того, що дрібні частинки можуть інтенсивно псевдозріджуватися або навіть підніматися вгору, тоді як великі частинки утворюють фільтрувальний шар на дні апарату.

Щоб уникнути вертикальної сепарації частинок різного розміру, апарат виконують розширюваним догори. У такій конструкції, за правильно підбраного кута конуса, швидкість псевдозрідженого агента змінюється по висоті шару, що дозволяє забезпечити рівномірне псевдозрідження всіх частинок і запобігає їхній сепарації.

Кут конусності для апаратів із киплячим шаром рекомендується приймати в межах 10-16°, що забезпечує рівномірне заповнення всієї активної частини апарату без утворення застійних зон і ділянок із низькою

швидкістю руху матеріалу в щільній фазі. При цьому площу нижньої основи конуса визначають, орієнтуючись на швидкість початку псевдозрідження найбільшої частинки шару, а площу живого перетину газорозподільної решітки – за швидкістю витання газу. Верхню основу конуса розраховують з урахуванням швидкості витання дрібних частинок, що повинні залишатися в шарі. Значення цих швидкостей отримують розрахунковим або експериментальним шляхом.

В апаратах із фонтануючим шаром матеріал по центру піднімається в розбавленій фазі з високою швидкістю, тоді як на периферії опускається вниз у щільній фазі. Для таких конструкцій рекомендується кут конусності від 35 до 60° і більше. Діаметр нижньої основи обчислюють із врахуванням швидкості, яка перевищує витання найбільших частинок шару, щоб запобігти їх осіданню на підтримуючій сітці. При цьому живий перетин сітки зазвичай складає 50-60 %, що гарантує безперервний рух матеріалу та запобігає закупорюванню апарату.

Грануляція в киплячому шарі є складним фізико-хімічним процесом, інтенсивність якого визначається великою кількістю факторів. До основних чинників належать закономірності гідродинаміки ПШ, контроль хімічного та гранулометричного складу, а також ефективність тепло- і масообмінних процесів у апараті.

Підсумовуючи наведене, можна виділити наступні висновки. Апарати з ПШ відзначаються порівняно простою конструкцією, а їх механізація та автоматизація здійснюється відносно легко. Завдяки широкому поширенню та здешевленню мікропроцесорної техніки, з'явилася можливість підвищувати продуктивність апаратів шляхом використання доступних, простих у налаштуванні та обслуговуванні керуючих пристроїв на базі мікропроцесорів. Таким чином, дана кваліфікаційна робота присвячена вирішенню окремих задач автоматизації процесів виробництва мінеральних добрив, забезпечуючи ефективне управління технологічним циклом і контроль ключових параметрів процесу.

## **2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови автоматизованої системи виготовлення мінеральних добрив**

### **2.1 Системи зневоднення та гранулювання**

Для підвищення продуктивності секції гранулювання передбачено її модернізацію. Перший етап включає вдосконалення вузла газорозподільних решіток та інтеграцію в гранулятор механізму повернення центів у шар. Подальше збільшення продуктивності установки досягається шляхом встановлення залежності між кінетичними характеристиками процесу та конструктивними параметрами вузла подачі рідкої фази у шар під час роботи гранулятора.

Інтегральним показником ефективності процесу визначено вихід гранульованого продукту, який у цій роботі виступав цільовою функцією. Критерієм прийнятого рівня ефективності встановлено досягнення виходу гранул понад 75%, що забезпечує достатній рівень продуктивності секції.

Ключовим технологічним параметром процесу грануляції є висота ПШ в грануляторі.

За результатами аналізу запропонованих рішень визначено оптимальну висоту шару, яка характеризується середнім часом перебування матеріалу, що відповідає кінетичному часу та необхідному терміну перебування частинок у апараті. Водночас має повністю реалізовуватися внутрішнє джерело центрів грануляції.

Дослідження показали, що поєднання визначеної висоти шару з температурою теплоносія забезпечує стабільний режим грануляції. Фізична модель процесу повністю враховує принципи рівномірного розподілу рідкої фази по поверхні зернистого матеріалу, що сприяє оптимальному формуванню гранул та ефективному перебігу процесу.

Час сушки гранул повинен бути меншим за тривалість циклу руху. Досягти цього можна шляхом збільшення висоти шару, однак цей параметр обмежений стійкістю гідродинаміки. Підвищення висоти шару кипіння призводить до переходу процесу у бульбашкове кипіння з утворенням застійних зон та іншими негативними явищами, характерними для цього режиму, що може погіршувати ефективність тепло-масообміну та якість псевдозрідження.

Введення у середину ПШ потужного чинника, який дестабілізує його динаміку, у вигляді великої кількості рідкої фази, потребує ефективного відведення зернистого матеріалу з зони зрошування. Для цього в апараті необхідно забезпечити активний режим циркуляції матеріалу в шарі. Очевидно, що досягти високого рівня циркуляції в апаратах із значною товщиною шару при великих об'ємах вологи неможливо без координації роботи газорозподільного пристрою та вузла подачі рідкої фази.

При проведенні процесу грануляції в ПШ важливим параметром стабілізації є еквівалентний діаметр частинок, що перебувають у шарі. Цей показник може слугувати якісною характеристикою дисперсного складу ПШ. Аналіз динаміки зміни окремих фракцій дисперсного матеріалу дозволяє однозначно оцінити як якісні, так і кількісні властивості шару, а також відстежити періоди його стабілізації.

Під час грануляції розчинів з одним компонентом динаміка еквівалентного діаметра частинок  $D_e$  та масових часток окремих фракцій дозволяє визначити момент встановлення стаціонарного режиму процесу.

До ключових параметрів, що істотно впливають на процес грануляції, належать температура теплоносія в шарі  $T_{ш}$  та висота ПШ, що може бути оцінена через його гідравлічний опір  $\Delta\rho_{ш}$ . Нижче наведено методи визначення основних параметрів технологічного процесу [11].

#### 1. Вихід готового продукту

$$\eta = \frac{G_{\text{роз}}}{G_M}, \quad (2.1)$$

де  $G_{роз}$  – кількість готового продукту, що розвантажується з апарату, кг;  $G_m$  – кількість солі, що подається до апарату з розчином, кг.

## 2. Загальна константа розвантаження

$$k = \frac{G_m}{G_u}, \quad (2.2)$$

де  $G_u$  – маса ПШ, кг;

## 3. Маса ПШ

$$G_u = \frac{\Delta P_u \cdot F_a}{g}, \quad (2.3)$$

де  $\Delta P_u$  – гідравлічний опір шару, Па;  $F_a$  – площа апарату в зоні газорозподільної решітки, м<sup>2</sup>;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

або

$$G_u = \frac{\pi D_e^3}{6} n \rho_m, \quad (2.4)$$

де  $D_e$  – еквівалентний діаметр частинок в шарі, м;  $n$  – кількість частинок в шарі;  $\rho_m$  – густина частинок, приймається 1000 кг/м<sup>3</sup>, враховуючи коливання в межах 900-1050 кг/м<sup>3</sup>.

Виразивши загальну поверхню частинок в шарі

$$f_u = \pi D_e^2 n, \quad (2.5)$$

співвідношення (2.4) прийме вигляд

$$G_u = \frac{D_e}{6} f_u \rho_m. \quad (2.6)$$

Звідси, загальна поверхня шару обчислюється за

$$f_u = \frac{6G_u}{D_e \rho_m}. \quad (2.7)$$

4. Густина зрошування шару по волозі дорівнює

$$a_f = \frac{G_{вол}}{f_u}, \quad (2.8)$$

де  $G_{вол}$  – кількість вологи в розчині, кг;  $f_u$  – поверхня шару, м<sup>2</sup>.

Еквівалентний діаметр частинок шару

$$D_e = \frac{1}{\sum_i \frac{x_i}{d_i}}, \quad (2.9)$$

де  $x_i$  – масова частка  $i$ -тої фракції (за даними ситового аналізу);  $d_i$  – середній розмір  $i$ -тої фракції, мм.

Слід окремо зазначити, що конструктивні параметри ротора мають значний вплив на кінетику гранулювання в ПШ.

Швидкість стікання рідини з краю диска ротора  $w_p$  з достатньою точністю можна приймати рівною лінійній швидкості точок краю диска  $w_n$ , м/с

$$w_p = w_n = \frac{\pi d_p n}{60}, \quad (2.10)$$

де  $d_p$  – діаметр диску ротора, м;  $n$  – кількість обертів ротора, об/хв.

Отже, предметом теоретичних і експериментальних досліджень є:

- конструкція вузла подачі рідкої фази в апарат;
- параметри обертання ротора та їх взаємозв'язок з іншими технологічними характеристиками процесу.

### **Установка для проведення процесів грануляції розчинів**

Дана установка призначена для стабільного проведення процесу грануляції розчинів сульфату амонію, отримання кінцевого продукту із заданим фракційним складом, оперативного контролю технологічного процесу та вимірювання основних технологічних параметрів. Схема установки наведена на рис. 2.1.

Гранулятор 1 являє собою апарат з киплячим шаром і прямокутною камерою. Верхня частина камери розширюється в обидва боки та з'єднана з циклоном для ефективного видалення газів і пилу. Вузол розвантаження матеріалу, розташований на рівні газорозподільної решітки, забезпечує як загальне, так і селективне вивантаження гранул різного розміру. Камера

гранулятора виготовлена з нержавіючої сталі марки 12Х18Н10Т, що гарантує стійкість до корозії та високих температур.

До нижньої частини камери прикріплена жалюзійна газорозподільна решітка з можливістю регулювання відкритості  $\phi$  від 4% до 10%, що створює інтенсивний гідродинамічний режим, забезпечує рівномірну грануляцію частинок і запобігає утворенню застійних зон. Така конструкція сприяє підвищенню ефективності процесу та стабільності отриманого продукту.

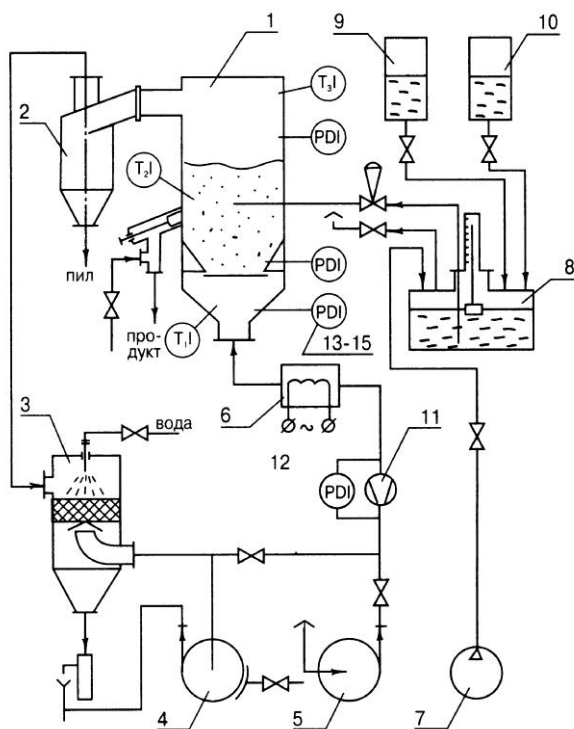


Рисунок 2.1 – Схема установки для проведення грануляції розчинів:  
1 – апарат із ПШ; 2 – циклон; 3 – скруббер; 4 – вакуум-насос; 5 – газодувка; 6 – калорифер; 7 – компресор; 8 – бак робочого розчину; 9, 10 – ємності вихідних розчинів; 11 – камерна діафрагма; 12 – 15 – дифманометри.

Для забезпечення подачі теплоносія з необхідною температурою на установці використовується електрокалорифер 6. На вході апарата, перед газорозподільною решіткою, встановлено хромель-копелева безінерційна термопара, яка контролює температуру теплоносія. Регулювання температури здійснюється шляхом вмикання та вимикання окремих секцій електрокалорифера.

Під час роботи установки надмірний тиск, створюваний газодувкою 5, та розрідження, яке генерує вакуум 4, забезпечують подачу повітря через

вимірювальну діафрагму 11 у електрокалорифер 6. Після нагрівання теплоносії із заданою температурою подається у дифузор апарата 1 і далі через газорозподільні ґрати рівномірно надходить у ПШ, забезпечуючи стабільний режим роботи установки та ефективно перемішування матеріалу.

Одночасно в ПШ подається розчин сульфату амонію через газорозподільний пристрій (ротор), який забезпечує рівномірне змочування поверхні частинок у шарі. Розподільний механізм виконаний у вигляді обертових дисків, що гарантують однорідне нанесення розчину.

Відпрацьований теплоносій після сухої очистки в циклоні 2 та мокрої обробки в скрубєрі 3 відсмоктується вакуум-насосом 4 і викидається в атмосферу, забезпечуючи безпечний викид газів.

Відбір готової товарної фракції здійснюється через розвантажувальний пристрій, а матеріал, затриманий у циклоні 2, накопичується та розвантажується в колбу для подальшого використання.

На установці ведеться комплексне вимірювання параметрів: температури теплоносія на вході в апарат, у ПШ та на виході, за допомогою практично безінерційних хромель-копелевих термопар; витрати теплоносія контролюються камерною діафрагмою, а розчин, що подається в шар, визначається за рівнем у живлячій ємкості. Також реєструється перепад тиску на газорозподільній решітці та в ПШ, а внутрішній тиск апарату контролюється U-подібними водяними дифманометрами.

### **Газорозподільний пристрій**

Визначальним елементом для забезпечення ефективних тепломасообмінних процесів в апараті з ПШ є газорозподільний пристрій. Його значення особливо зростає при сушінні термолабільних розчинів, застосуванні теплоносія з температурою, яка значно перевищує температуру плавлення оброблюваного продукту, а також при високих навантаженнях по рідкій фазі.

Головним завданням газорозподільного пристрою є формування рівномірного активного гідродинамічного режиму по всьому об'єму шару. Під час введення рідкої фази в шар із вмістом сухих речовин менше 50% ці вимоги доповнюються необхідністю забезпечення інтенсивного спрямованого перемішування матеріалу у всьому об'ємі: від зон подачі рідини до зони сушіння гранул, що забезпечує рівномірність сушіння та оптимальні умови тепломасообміну.

Регулярність та стабільність цього процесу сприяють зменшенню кінетичної висоти ПШ та підвищенню гідродинамічної стійкості технологічного процесу. Кінетична висота (маса) шару характеризує ту величину, при якій частинки шару не перезвожуються і не піддаються інтенсивному стиранню. Зі зростанням вологості навантаження цей параметр збільшується. Тому конструкція газорозподільного пристрою повинна забезпечувати кінетичну висоту 400-500 мм при навантаженні вологою від 700 до 1000 кг на 1 м поверхні пристрою.

Крім того, для апаратів із неперервним режимом роботи газорозподільний пристрій має гарантувати вивід із шару великих агломератів, що формуються під час експлуатації з різних причин.

Найбільше таким вимогам відповідає газорозподільний пристрій жалюзійного типу. Схема жалюзійної решітки наведена на рис.2.2. Основним елементом решітки є плоска рухома пластина, розташована під кутом  $7^\circ$  до горизонту, із зазором  $h$  відносно нерухомих колосників. Довжина  $l$  частини пластини, яка контактує із шаром, є ключовим конструктивним параметром, що визначає надійність роботи установки в умовах проведення технологічного процесу.

Коефіцієнт живого перетину визначається з співвідношення

$$\varphi = \frac{n \cdot h \cdot B}{B \cdot L} \cdot 100 = \frac{n \cdot h}{L} \cdot 100, \quad (2.11)$$

де  $n$  – кількість щілин в газорозподільній решітці;  $h$  – величина зазору в кожній з щілин, мм;  $B, L$  – відповідно ширина і довжина жалюзійної решітки, мм.

У ході виконання роботи коефіцієнт живого перетину  $\phi$  регулюється шляхом зміни величини зазорів  $h$  у діапазоні від 4 до 4,75% за допомогою упорних гвинтів, що дозволяє точно налаштувати параметри системи.

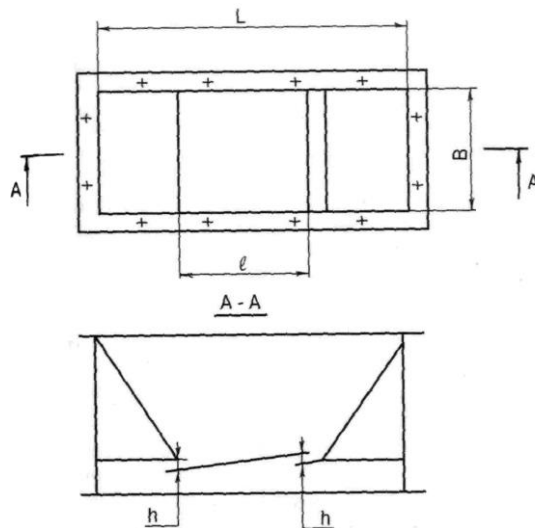


Рисунок 2.2 – Газорозподільна решітка жалюзійного типу

Регулюючи об’єм подачі повітря в апарат, змінюється гідравлічний опір на газорозподільному елементі системи.

Гідравлічний опір газорозподільного пристрою визначається за виразом

$$\Delta P_p = \xi \frac{\omega_{ш}^2 \cdot \rho_{rt}}{2}, \quad (2.12)$$

де  $\Delta P_p$  – гідравлічний опір решітки (газорозподільного пристрою), Па;  $\xi$  – коефіцієнт гідравлічного опору решітки  $\theta$  (газорозподільного пристрою);  $\omega_{ш}$  – швидкість повітря в щілинах решітки, м/с<sup>2</sup>;  $\rho_{rt}$  – густина повітря, що подається в апарат при даній температурі, кг/м<sup>3</sup>.

### Вузол введення рідкої фази в апарат

Для забезпечення подачі розчину у ПШ у формі тонкодисперсних крапель на досліджуваній установці як базовий варіант застосовується

однодисковий живильник. Конструкція вузла введення представлена на рис.2.3.

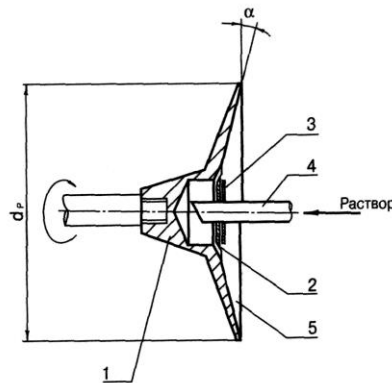


Рисунок 2.3 – Конструкція вузла введення з монодисковим ротором

Робочий розчин подається у порожнину 6, звідки під дією відцентрової сили потрапляє на робочу поверхню ротора 5, рівномірно розподіляючись по ній у вигляді безперервної плівки та рухаючись до його кромки.

На гранули розчин впливає двома основними шляхами. Перший варіант полягає в тому, що гранули потрапляють безпосередньо на робочу поверхню ротора, покриваються плівкою розчину, поглинають певну його кількість і відкидаються відцентровими силами до периферії. Через невелику площу ротора та велику поверхню шару цей спосіб нанесення розчину складає незначну частину процесу.

Другий і основний шлях – це нанесення методом розбризкування. Розчин зі значною швидкістю відривається від ротора у вигляді плівки, яка на певній відстані розпадається на потік дрібних крапель, формуючи розпилювану площину. Потрапляючи на гранули, краплі забезпечують рівномірне покриття матеріалу.

Припускаючи, що швидкість розчину на момент відриву від ротора дорівнює лінійній швидкості його кромки  $W_p$ , можливо визначити ефективну товщину плівки розчину на момент її відриву від ротора, що дозволяє оцінити інтенсивність і рівномірність процесу нанесення.

$$h = \frac{V_p}{W_p \pi d_p}, \quad (2.13)$$

де  $V_p$  – кількість розчину, що подається,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Стійкий процес грануляції досягається при товщині плівки  $h=0,47 \cdot 10^{-6}\text{м}$ , діаметрі ротора  $d_p=0,80\text{ м}$  та швидкості обертання ротора  $n=3000\text{ об/хв}$ , при витраті розчину  $V_p=5 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3/\text{год}$ .

При збільшенні навантаження на ротор або зменшенні витрати розчину  $W_p$  спостерігається проковзування розчину по робочій поверхні ротора, що призводить до переходу процесу в режим розпилювання крапель розміром понад 2 мм. У такому випадку одиничній гранулі не вистачає сорбційної здатності для повного вбирання розчину, і на її поверхні залишається надлишок рідини. При контакті з іншою гранулою відбувається злипання, а кристалізація розчину спричиняє утворення конгломератів.

Для оптимізації процесу рекомендується підтримувати витрату розчину та параметри обертання ротора в межах заданих значень, що забезпечує стабільне формування гранул і зменшує ймовірність утворення конгломератів.

Розробка нової конструкції ротора приведена на рис. 2.4.

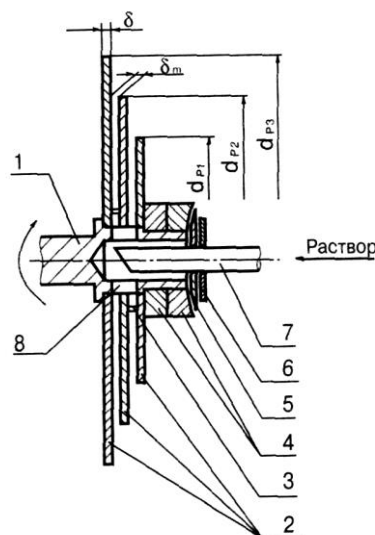


Рисунок 2.4 – Конструкція вузла введення з полідисковим ротором

Відцентровий розподільувач складається з вала 1, на якому розташовані три диски 2 різних діаметрів. Диски закріплюються на валу за

допомогою гайок 4, причому крайня гайка оснащена конічною проточкою, що спрощує захист внутрішньої порожнини валу шайбою 5 від попадання гранул. Зазор між дисками регулюється дистанційними упорами 3 в межах 0,9–2 мм.

Розчин подається через трубку 7 у порожнину вала, а потім, проходячи через отвори 8, під дією відцентрової сили потрапляє на поверхню дисків і розпилюється з їх кромок.

Конструкція розподільвача уніфікована, що дозволяє змінювати зазор між дисками, їх кількість та діаметри відповідно до технологічних вимог.

Розрахуємо максимальний об'єм розчину, що може протікати через ефективну площу під дією гідростатичного тиску, створеного різницею висот між ротором та натискним баком, яка становить  $H = 500$  мм.

Швидкість стікання розчину через ефективний перетин

$$W_1 = \sqrt{\frac{2Hq}{\varphi}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0.5 \cdot 9.8}{0.8}} = 3.13 \text{ м/с,} \quad (2.14)$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт гідравлічного опору,  $\varphi = 0,8$ .

Максимальні витрати розчину через ефективний перетин отворів

$$Q_{\max} = S_e \cdot W_1 = 5.45 \cdot 10^{-5} \cdot 3.13 = 1.7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 / \text{с} = 0.614 \text{ м}^3 / \text{год} \quad (2.15)$$

Наявність кількох розподільних поверхонь забезпечує збільшення навантаження розчину на ротор без зміни його основних габаритів, дозволяє проводити розпилювання в оптимальному діапазоні товщин плівки на кромці та наносити розчин не лише в одній площині, а по декількох шарах, що створює ефект об'ємного розпилювання. Крім того, багатодискова конструкція ротора є більш технологічною для виготовлення та характеризується підвищеними експлуатаційними та механічними властивостями, що забезпечує надійність і тривалий термін служби обладнання.

## 2.2 Основні технологічні параметри процесу виготовлення мінеральних добрив

Основними технологічними показниками процесу зневоднення та гранулювання в псевдозрідженому шарі є температура теплоносія в шарі та на вході в апарат, висота шару і розмірна дисперсність частинок для конкретного хімічного складу робочого розчину [9].

Встановлення взаємозв'язку між параметрами процесу та змінами кривих розподілу гранул дозволяє визначити вплив окремих чинників на кінетику гранулоутворення. Для більшості матеріалів підвищення температури шару спричиняє збільшення частки дрібних гранул, що свідчить про термічний характер їх дроблення [3]. Експериментально встановлено, що збільшення подачі розчину в шар при незмінній його висоті, а також підвищення концентрації робочого розчину стимулюють ріст гранул [3], що дозволяє коригувати параметри процесу для отримання потрібного розподілу частинок.

Висота нерухомого шару визначає величину втрати тиску  $\Delta P$ , що відображає енергетичні витрати на процес зважування. Ступінь розширення та фактична робоча висота киплячого шару  $H_r$  залежать від робочої швидкості газу та параметра  $u$ .

Концентрація твердих частинок у розчині й продуктивність гранулятора зазвичай задаються на початковому етапі розрахунку. Основними змінними параметрами є температура шару та його висота, що визначаються робочою швидкістю газового потоку.

Температура теплоносія  $T_t$  – газу, який зріджує шар під газорозподільною решіткою – зазвичай перевищує температуру плавлення оброблюваного матеріалу, тоді як температура в самому шарі визначається необхідною кінцевою вологістю продукту і не перевищує його температури плавлення.

Розрахунок гранулятора з ПШ при заданій продуктивності включає кілька етапів: визначення дисперсного складу готового продукту і параметрів

шару, вибір оптимальної температури, складання матеріального та теплового балансів, а також визначення параметрів газорозподільної решітки для забезпечення ефективної роботи установки.

Приклад розрахунку гранулятора, зображеного на рис.2.5, де 1 – камера гранулятора; 2 – камера спалювання природного газу (калорифер); 3 – вентилятор; 4 – вхідний дифузор; 5 – газорозподільний пристрій; 6 – пневматичний сепаратор; 7 – подача початкового розчину; 8 та 9 – введення і виведення теплоносія з апарату; 10 – подача розчину; 11 – подача гранульованого продукту.

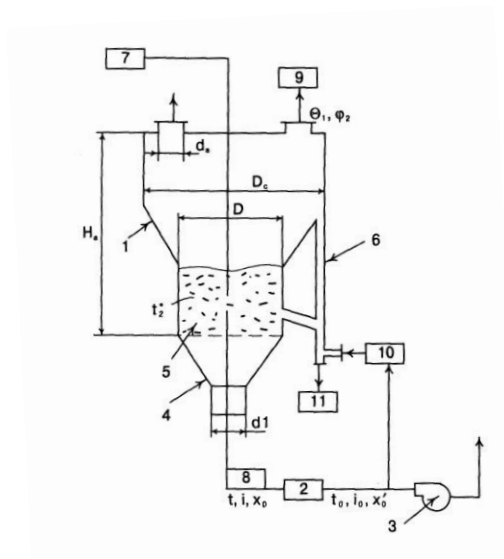


Рисунок 2.5 Схема установки гранулювання

### Початкові дані для розрахунку

Продуктивність по гранульованому продукту –  $P_2$ ;

$d_n$  – середній діаметр готового продукту;

$s_i$  – масова доля частинок заданого розміру в готовому продукті;

$u_2$  – кінцева вологість продукту;

$x_p$  – концентрація початкового розчину;

$t_1$  – температура теплоносія на вході в шар;

$t_2$  – температура шару;

$t_0$  – температура зовнішнього повітря;

$\varphi_0$  – вологість зовнішнього повітря (відносна);

$x_0$  – вологовміст повітря.

### Матеріальний баланс гранулятора

Витрати початкового розчину, розраховані з урахуванням заданої продуктивності та неминучих втрат  $\alpha$

$$\sigma_1 = (1 - \alpha)\sigma_2 \frac{100 - U_2}{100 - (100 - x_p)} \quad (2.16)$$

Кількість випаровувань води

$$W = \sigma_1 - \sigma_2 \quad (2.17)$$

### Тепловий баланс регулятора

Склад природного газу:  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ .

Тепло згорання газу

$$Q_H^p = 358.2 \cdot \text{CH}_4 + 637.5 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 912.5 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 \quad (2.18)$$

### Вологовміст димових газів

При значенні температури димових газів, що дорівнює  $t_1$ , розраховується витрата природного газу на одиницю 1 кг повітря

$$g_2 = \frac{i_1 - i_0}{Q_H^p} \quad (2.19)$$

де  $i_1$  – ентальпія повітря, що виходить з камери згорання

$$i_1 = (1 + 1.96x'_0)t_1 + 2480x'_0 \quad (2.20)$$

де  $i_0$  – ентальпія повітря, що потрапляє в камеру згорання

$$i_0 = (1 + 1.96x'_0)t_0 + 2480x'_0$$

В результаті після камери згорання вміст води в димових газах можна визначити за співвідношенням

$$x_0 = g_2 \cdot \sum \frac{0.09}{12m + n} C_m H_n + x'_0 \quad (2.21)$$

Витрати теплової енергії на операції сушіння та грануляції.

Теплова енергія, що втрачається в грануляторі, розрахована відносно 1 кг видаленої вологи:

$$\Delta = q_m + q_n - C_5 \Theta_1, \quad (2.22)$$

де  $q_m = \text{ПС}(t-\Theta)/W$  – втрати тепла з висушенням матеріалом;  $q_n$  – втрати тепла в навколишнє середовище (5% від загальної витрати).

Абсолютний вологовміст

$$x_2 = \frac{i_1 + x_0 \Delta - 1.0 \cdot t_2}{\Delta + 1.96 t_2 + 248 C}. \quad (2.23)$$

Питомі витрати тепла

$$q = \frac{(i_1 - i_0)}{(x_2 - x_0)}. \quad (2.24)$$

Тепловий ККД гранулятора

$$\eta = \frac{r}{g}. \quad (2.25)$$

Загальні витрати тепла

$$Q = qW. \quad (2.26)$$

Витрати природного газу

$$V_2 = \frac{Q}{(Q_H^p \eta_0)}. \quad (2.27)$$

Питомі витрати теплоносія:

$$\xi = 1(x_2 - x_0). \quad (2.28)$$

Загальні витрати теплоносія

$$L = \xi W.$$

Відносна вологість відпрацьованого теплоносія

$$\varphi_2 = \frac{x_2 \cdot \Pi \cdot 100}{p_{нас}(x_2 + 0.622)}. \quad (2.29)$$

Об'єм вологого теплоносія на виході з гранулятора при  $t$ ,  $\varphi$  та  $p=100000\text{Па}$

$$V_{OT} = \frac{LR_r(T_0 + t_2)}{p_{нас}(100 - \varphi_2)}. \quad (2.30)$$

Об'ємна подача дуючого вентилятора

$$V_B = \frac{L}{P_B} . \quad (2.31)$$

### **2.3 Аналіз апарату виготовлення мінеральних добрив як об'єкта керування та вибір принципу побудови системи керування**

Процес гранулювання в ПШ є безперервним: установка виводиться на робочий режим і функціонує в номінальному режимі до повного використання сировини або до виникнення рідкісних аварійних ситуацій, пов'язаних із подачею газу чи повітря. Тривалість виходу на робочий режим невелика порівняно з часом роботи в основному режимі.

Вихід на режим здійснюється за допомогою поступового збільшення витрати розчину та підвищення температури шару при заздалегідь встановленому тиску на вході, який коригується у міру росту гранул. При збільшенні діаметру гранул  $D_e$  до певного значення запускається процес рециркуляції, що передбачає розпад великих гранул і формування нових центрів грануляції з отриманих осколків.

Вимога забезпечення плавності та контрольованої швидкості грануляції створює практично квазістатичний режим роботи апарату, коли динамічні коливання системи не суттєві порівняно зі швидкістю зміни вхідних параметрів. З огляду на це, процес виходу на робочий режим легко піддається автоматизації, забезпечуючи стабільну та ефективну роботу установки.

Актуальним завданням є стабілізація температури шару, де керуючим параметром виступає струм калорифера, а збурюючими чинниками – зміни вологості, товщини шару під час періодичного вивантаження та інші повільні або рідко змінні величини, обумовлені впливом зовнішніх факторів. Автоматична система має бути побудована на базі сучасних ефективних

технічних і програмних засобів, що відзначаються надійністю, економічністю та простотою експлуатації.

Апарат для зневоднення і гранулювання в ПШ є системою з розподіленими параметрами, у якій одночасно протікає комплекс тепло- і масообмінних процесів.

З точки зору спостереження, вхідними величинами вважаються температура псевдозріджуючого газу на вході апарата  $t_1$  та швидкість його потоку  $W$ . До нерегульованих вхідних параметрів належать перепад тиску газу між входом і виходом із шару  $\Delta P$ , температура газу на виході  $t_2$ , а також температура та концентрація розчину, що подається в шар.

Система автоматизації повинна забезпечувати контроль і компенсацію цих факторів, щоб підтримувати стабільний температурний режим і оптимальні умови для процесу гранулювання, враховуючи як швидкі, так і повільні коливання зовнішніх і внутрішніх параметрів.

Вихідним параметром процесу є гранулометричний склад продукту, тобто масова частка кожної гранульованої фракції. Основна мета створення системи управління полягає у підтриманні заданого складу продукту шляхом регулювання вхідних величин ( $t_1$ ,  $W$  та інші). Для цього необхідно теоретично та експериментально визначити залежність між гранулометричним складом продукту та змінними вхідного впливу.

Аналіз існуючих підходів показав, що розроблені фізико-концептуальні моделі (статистична, модель двох взаємопроникаючих середовищ, двофазна) пояснюють і враховують окремі властивості процесу, але не забезпечують достатньо повного та точного відображення перетворення вхідних змінних у змінні внутрішнього стану процесу та вихідні показники якості продукту.

Розрахунок основних технологічних параметрів процесу, навіть приблизний, дозволяє виконати аналіз і проектування грануляторів, забезпечуючи можливість наближеного синтезу та оптимізації їх роботи.

Проте немає повної впевненості, що спроектований агрегат буде працювати в оптимальному режимі. Це пояснюється як наближеним характером всіх розрахунків, так і невизначеністю процесу щодо властивості робастності, тобто нечутливості якості технологічного процесу до відмінностей між передбачуваними та реальними умовами.

Крім того, аналіз експлуатації існуючих установок свідчить, що процес стабільно керується лише в обмеженому діапазоні значень змінних станів. Наприклад, надмірне дуття призводить до виносу частинок з агрегату, недостатнє – до спікання шару; занадто низька температура не забезпечує випаровування води та росту кристалів, тоді як надто висока може викликати руйнування великих гранул або спікання частинок у шарі.

Таким чином, задача керування процесом розбивається на низку підзадач: контролювання подачі повітря, регулювання температурного режиму, підтримка рівномірного шару матеріалу та забезпечення стабільного росту кристалів без пошкодження гранул; виведення змінної стану у робочу зону стабільного процесу зневоднення та гранулювання; підтримка стабільності технологічного параметра в зазначеній зоні.

Відповідно до принципів системного підходу [12], для ефективного вирішення зазначених завдань слід:

- проаналізувати режими виходу змінної стану у робочу зону та оцінити можливості її стабілізації;
- провести оптимізацію конструктивних параметрів керуючих елементів установки, зокрема вузла введення розчину;
- розробити та реалізувати систему автоматичного регулювання температури ПШ у грануляторі-сушарці, забезпечуючи точне підтримання заданих параметрів процесу.

## **3 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень автоматизованої системи виготовлення мінеральних добрив**

### **3.1 Розробка та опис функціональної схеми автоматизованої системи виготовлення мінеральних добрив**

Автоматичне підтримання заданого температурного режиму здійснюється системами керування із зворотним зв'язком, які формують керуючі впливи залежно від величини відхилення регульованої величини від встановленого значення.

Функціональною називають схему автоматичної системи регулювання, що включає елементи з урахуванням їх призначення: чутливі, перетворювальні та підсилювальні, а також виконавчі й регульовальні блоки.

Для конкретного завдання автоматичного регулювання можлива побудова лише однієї функціональної схеми системи. Кожен елемент такої схеми може бути замінений відповідним пристроєм автоматики, що виконує аналогічну функцію [13].

Автоматизована система повинна включати задаючий пристрій, вимірювальний блок, мікроконтролер, підсилювач потужності, сам об'єкт регулювання та датчик температури. Функціональна схема системи керування технологічним процесом виробництва мінеральних добрив з точки зору теорії автоматичного керування (ТАК) представлена на рис. 3.1, демонструючи взаємозв'язок між усіма основними елементами системи.

Сигнал від датчика температури Д передається на вхід порівняльного елемента, який входить до складу вимірювального блоку ВБ. У порівняльному елементі формується сигнал невідповідності, що визначається різницею між сигналом задавача та сигналом датчика температури. Далі, за допомогою мікроконтролера, формується керуючий сигнал для вмикання або

вимикання спіралі нагрівального елемента, при цьому сигнал попередньо підсилюється для забезпечення необхідної потужності впливу.

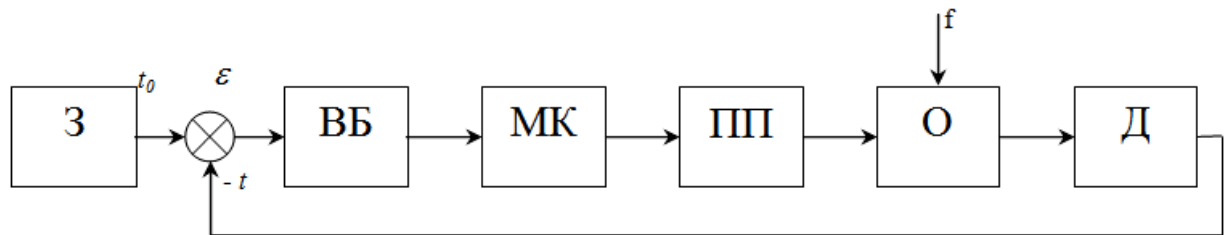


Рисунок 3.1 – Функціональна схема САК виготовлення мінеральних добрив:

З – задаючий пристрій; ВБ – вимірювальний блок; МК – мікроконтролер;  
ПП – підсилювач потужності; О – об’єкт регулювання; Д – датчик.

До складу мікроконтролера входить погоджувальний блок, що виконує функцію масштабуючого підсилювача та забезпечує приведення сигналу від датчика до рівня, придатного для обробки мікроконтролером.

В якості збурюючих впливів розглядаються: тиск на вході  $P_{вх}$ , витрати робочого розчину  $Q$ , а також перепад тиску в шарі  $\Delta P_{ш}$ .

Вимірювальний блок представлений перешкодозахищеним підсилювачем із вбудованим задатчиком. У ньому здійснюється компенсація електрорушійної сили (Е.Р.С.) термопари та сигналу задатчика. У поєднанні з термопарою та регулюючим пристроєм цей блок застосовується в системах високоточного контролю та регулювання температури. Сигнал термопари у блоці компенсується сигналом від вбудованого задатчика, після чого різниця сигналів підсилюється попереднім підсилювачем, що дозволяє забезпечити стабільність і точність вимірювання.

З виходу вимірювального блоку посилений сигнал розбіжності надходить на вхід регулятора. Пристрій формує закон керування та перетворює вхідний сигнал у уніфікований постійний струм 0-5 мА, який надалі може застосовуватись у блоках живлення (тиристорних або магнітних) та інших пристроях регулювання нагрівання.

У запропонованій системі регулятор передбачається реалізувати на основі мікропроцесора. Це дозволяє обладнати його індикаторами для

контролю величини розбіжності, органами динамічного налаштування та перемикачем режиму керування, що дає змогу переходити до ручного управління об'єктом.

Для проекту необхідно обрати мікропроцесор із наявним аналоговим виходом, що забезпечить формування аналогового регулюючого пристрою. Такий регулятор здатний реалізовувати різні закони керування: пропорційний (П), пропорційно-диференціальний (ПД), пропорційно-інтегральний (ПІ) та пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД), що забезпечує гнучке й точне регулювання технологічного процесу.

### **3.2 Вибір датчика температури**

Сучасна термодинаміка розглядає температуру як величину, що характеризує стан внутрішнього руху рівноважної макроскопічної системи і залежить від внутрішньої енергії та зовнішніх параметрів об'єкта. Пряме вимірювання температури неможливе її оцінюють за зміною зовнішніх параметрів, що виникає внаслідок порушення рівноваги через теплообмін із навколишніми тілами.

Кожен метод визначення температури, що базується на залежності між певним зовнішнім параметром системи та її температурою, має відповідну послідовність значень цього параметра для різних температурних величин, яку прийнято називати температурною шкалою.

Існує кілька типів датчиків температури, які застосовуються для вимірювань у різних технологічних і наукових процесах. Основні з них включають:

- Терморезистивні датчики;
- Датчики на основі термопари;
- Термісторні датчики температури;
- Тонкоплівкові платинові датчики;
- Волоконно-оптичні датчики температури;

- Пірометри (безконтактні датчики температури): оптичні й інфрачервоні [14].

Весь діапазон температур поділено на сім окремих шкал, для вимірювання значень у кожній із яких застосовуються різні методи контролю та оцінки:

1). Від  $-271,65$  до  $-269,15$  °C ( $1,5$  до  $4$  K) – вимірювання тиску парів гелію-4;

2). Від  $-268,95$  до  $-259,35$  °C ( $4,2$  до  $13,8$  K) – германієві терморезистори;

3). Від  $-259,35$  до  $+0,01$  °C ( $13,8$  до  $273,16$  K) – платинові терморезистори;

4). Від  $+0,01$  до  $630,74$  °C ( $273,16$  до  $903,89$  K) – платинові терморезистори;

5). Від  $630,74$  до  $1064,43$  °C ( $903,89$  до  $1337,58$  K) – термопари платино родій – платина;

6). Від  $1064,43$  до  $2526,85$  °C ( $1337,58$  до  $2800$  K) – температурні лампи;

7). Від  $2526,85$  до  $100000$  °C ( $2800$  до  $100000$  K) – спектральні методи.

Враховуючи вимоги проектованої системи автоматичного регулювання, у якій робочий діапазон температур коливатиметься від  $0$  до  $450$  °C, найбільш доцільним є застосування шкали №4. Для вимірювання температури за технічними умовами ГОСТ «Шкали температурні практичні» оптимальним рішенням є використання термопари.

Принцип роботи термопари ґрунтується на термоелектричному ефекті: у замкненому ланцюзі з двох або більше різнорідних провідників виникає електричний струм, якщо хоча б два з'єднання провідників знаходяться при різних температурах.

На рис. 3.2 наведено характеристики стандартних термопар при  $t_0=0^\circ\text{C}$ . Зіставлення показує, що вимогам системи відповідає хромель-копелева термопара.

Ця термопара забезпечує найвищу термоелектрорушійну силу серед усіх стандартних типів, що дозволяє створювати термоелектричні термометри з вузькими температурними шкалами. Вони ефективні для вимірювання температур до 800 °С і мають у два рази вищу чутливість порівняно з хромель-алюмелевими термопарами. Крім того, хромель-копелева термопара стабільно функціонує в окисленому та відновлювальному середовищі, а також у вакуумі, що робить її універсальним інструментом для широкого спектру технологічних процесів.

Технічні характеристики хромель-копелевої термопари типу ТХК (L):

- діапазон температур – від – 40 до плюс 600 °С;
- діаметр термоелектродів (мм) – 0,5; 0,7; 1,2 та 3,2;
- матеріал ізоляції – керамічна трубка МКР, КТВП;

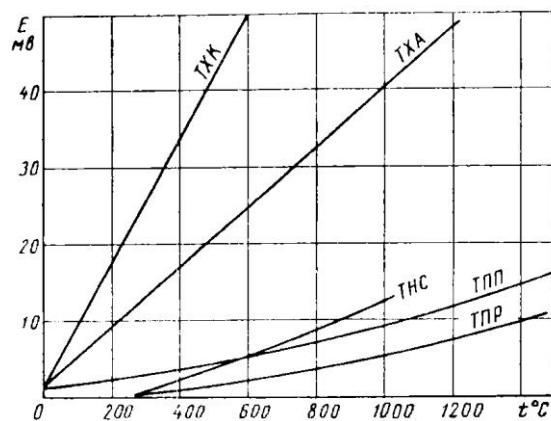


Рисунок 3.2 - Характеристичні криві стандартних термопар

Зовнішній вигляд термопари рис.3.3



Рисунок 3.3 Термопара типу ТХК

Сигнал надходить на блок перетворення сигналу термопар БПТ-22, де він трансформується та подається на вхід мікроконтролера для подальшої обробки.

Блок БПТ-22 призначений для перетворення сигналів низького рівня від термопар типів ТХА(К), ТХК(L), ТВР, ТПП(S), ТПР(B) у

уніфікований постійний струм із діапазоном 0-5 мА, 0-20 мА або 4-20 мА. Пристрій містить два ідентичних канали перетворення, гальванічно роз'єднані, що дозволяє одночасно підключати термопари з однаковими параметрами.

БПТ-22 забезпечує компенсацію термо-ЕРС вільних кінців термопар, усунення нуля вхідного сигналу та масштабування діапазону вимірювань. Крім перетворення термопар, блок може підсилювати низькорівневі напруги (0-100 мВ), отримані від джерел Е.

Перетворювач застосовується в системах автоматизованого регулювання та управління технологічними процесами в енергетиці, металургії, а також у вимірювальних і обчислювальних комплексах для точного контролю параметрів технологічного обладнання.

#### Принцип роботи блоку

Блок-схема перетворювача наведена на рис.3.4. Пристрій включає такі ключові функціональні елементи:

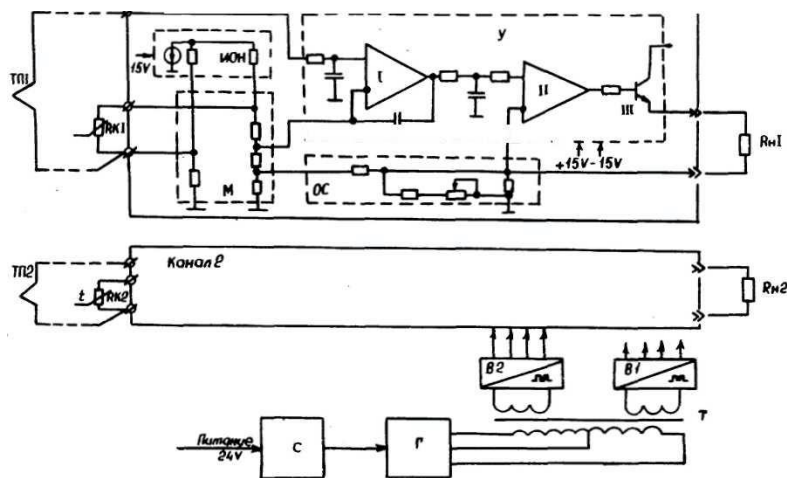


Рисунок 3.4. - Блок-схема перетворювача БПТ-22.

М – мостова схема;

У – 3-х каскадний підсилювач;

ОС – ланцюг негативного зворотного зв'язку;

В1, В2 – джерела живлення;

ДЗН – джерело зразкової напруги;

Стабілізатор типу З, Г, Т та генератор Роєра з розв'язуючим трансформатором.

Компенсація нульового початкового значення вхідного сигналу виконується за допомогою мостової схеми. Мостова конфігурація блоків, призначених для роботи з термопарами типів ТХА, ТХК, ТВР і ТПП, додатково забезпечує автоматичну компенсацію термо-ЕРС вільних кінців термопари за допомогою мідного чутливого елемента  $R_k$ , встановленого поблизу точки підключення вільних кінців термопари до клемної колодки та включеного в плече моста.

Вихідний сигнал блоку сумується з вихідною напругою мостової схеми і надходить на вхідний каскад підсилювача каналу, який одночасно виконує функцію активного фільтра. На виході першого каскаду додатково встановлено RC-фільтр, що разом із каскадом забезпечує ефективне придушення поперечних перешкод.

Другий і третій каскади підсилювача забезпечують підвищення потужності сигналу до рівня уніфікованого постійного струму. Всі каскади охоплені негативним зворотним зв'язком за вихідним струмом, що гарантує стабільність роботи підсилювача.

Джерела В1 та В2 забезпечують необхідну напругу для живлення каскадів підсилювача, а джерело зразкової напруги (ДЗН) формує опорну напругу для живлення мостової схеми.

Для підвищення перешкодозахищеності та гальванічного розділення каналів кожен канал підсилювача живиться від окремої обмотки розв'язуючого трансформатора Т, який входить до складу генератора Роєра Г. Генератор Роєра стабілізований по живленню за допомогою стабілізатора С, що забезпечує стабільність напруги та надійну роботу всієї системи.

### **3.3 Розробка принципової схеми**

Поява та стрімке вдосконалення мікропроцесорних пристроїв сприяли їх широкому впровадженню у різних галузях промисловості та народного господарства. Висока функціональна гнучкість, надійність, компактні розміри та доступна вартість роблять застосування мікропроцесорних засобів ефективним у системах автоматичного керування.

Сучасна елементна база цифрової техніки дозволяє створювати цифрові регулятори з програмною реалізацією операцій у режимі реального часу на основі мікропроцесорних платформ.

Структура, набір команд та апаратно-програмні засоби введення та виведення інформації мікроконтролерів оптимально підходять для реалізації завдань керування і регулювання в приладах, пристроях та автоматизованих системах. При проєктуванні мікропроцесорних систем автоматичного керування слід враховувати такі фактори: забезпечення заданих показників якості регулювання, оптимальний розподіл функцій між апаратною та програмною частинами, а також інтеграцію цифрових і аналогових компонентів системи для досягнення стабільної та надійної роботи.

Враховуючи наведені вимоги, для побудови мікропроцесорної системи автоматичного керування оптимально підходить однокристальний мікроконтролер типу AT90S4433.

Схема регулювання даного параметра включає дві ключові складові: слабкоструміву (керуючу) та силову (енергетичну) частини. Використання одного мікропроцесора для слабкострумівової частини підвищує надійність і гнучкість системи, спрощує реалізацію необхідних законів зміни керуючих дій. Оскільки інформація про процес закодована в цифровому сигналі і не залежить від енергетичної складової, вона менш чутлива до перешкод та викривлень.

Слабкострумівова частина мікропроцесорної САК відповідає за програмну реалізацію цифрового регулятора та формування спеціальних кодових послідовностей. Для живлення системи використовується

трансформатор потужністю не менше 5 Вт. Випрямні мости типу КЦ404 (VD3, VD4, VD5) забезпечують випрямлення змінної напруги. Конденсатори C7, C8, C9, C10 виконують функцію фільтрації, а C12, C13, C14, C15 – блокувальні конденсатори, що підвищують стабільність роботи.

Особливістю схеми є наявність окремих цифрової та аналогової землі, з'єднаних в одній точці. Це рішення зменшує рівень електричних перешкод, що можуть проникати з цифрової частини в аналогову, та підвищує точність роботи системи.

Для живлення системи застосовуються кілька стабілізованих джерел напруги: +15 В та -15 В використовуються для операційних підсилювачів сигналу з датчиків тиску та рівня, а також для забезпечення роботи задавача співвідношення руда/вода; напруга +5 В призначена для живлення процесорної частини та індикаційних елементів.

Напруга +10 В від блоку живлення подається на електронний стабілізатор +5 В. Конденсатор C18 виконує функцію додаткової ємності для згладжування пульсацій. Мікросхема DA4 (LM7805) є інтегральним стабілізатором напруги з компенсацією і рекомендується кріпити на радіатор площею не менше 10 см<sup>2</sup> для забезпечення ефективного тепловідведення.

Стабілізована напруга +5 В подається на два симетричних LC-фільтри: L2 + C21 та L3 + C22, які розділяють живлення на цифрову та аналогову частини. Конденсатори C24 і C25 виконують роль блокувальних, знижуючи рівень імпульсних перешкод. Напруга +5 В VCC використовується для цифрових вузлів, а аналогова +5 В A+ подається на основну схему мікропроцесорного пристрою.

Для коректної роботи вбудованого АЦП мікропроцесора на вивід AREF необхідно подавати опорну напругу в діапазоні від 2 В до 5 В, що забезпечує точність перетворення аналогових сигналів.

Для забезпечення живлення в схемі використано параметричний стабілізатор напруги на стабілітроні VD12, а резистор R21 обмежує струм

через стабілітрон у межах 5-10 мА. Необхідну опорну напругу для АЦП задає резистор R23, яка надходить на 21-й вивід мікропроцесора DD1 через LC-фільтр L1, C16. Напруга +5 В подається на 20-й вивід контролера, де C17 виконує функцію блокування перешкод. До 22-го виводу підключена аналогова земля контролера. Конденсатори C26 і C27 виконують роль фільтра та блокувального елемента відповідно, при цьому живлення надходить з аналогової частини стабілізатора +5 В.

Для живлення операційного підсилювача сигналу від датчиків та задавача співвідношення використовується стабілізована напруга  $\pm 15$  В. Випрямлена напруга  $\pm 20$  В з блоку живлення подається на входи інтегральних стабілізаторів DA2 (LM7815, +15 В) та DA3 (LM7915, -15 В). Конденсатори C1 і C2 виконують фільтрацію на вході стабілізаторів, C3 і C4 – на виході, а C5 і C6 застосовуються як блокувальні. Стабілізовані напруги +15 В і -15 В подаються на основну схему для живлення аналогових вузлів.

Задавач температури реалізовано на параметричному стабілізаторі 3,3 В, зібраному на резисторі R11 та стабілітроні VD7. Конденсатор C15 забезпечує фільтрацію сигналу, R14 використовується для грубого налаштування, а R13 – для точного калібрування. Після встановлення параметрів сигнал передається на 28-й вивід мікроконтролера.

Інформаційні сигнали від датчиків температури спочатку надходять на резистори R1 та R2, де відбувається їх первинне масштабування. Оскільки амплітуда цих сигналів є невеликою, після попереднього масштабування через резистори R3 та R4 вони подаються на підсилювачі постійної напруги, зібрані на основі операційного підсилювача DA1 типу TL082. Необхідний коефіцієнт підсилення формується співвідношенням резисторів R7/R5 та R8/R6.

Після підсилення до потрібного рівня сигнали через резистори R9 і R10 надходять на нульовий канал десятибітного АЦП, інтегрованого в однокристальну ЕОМ DD1. Для захисту входів контролера від перевищення

напруги при значеннях понад 5 В використовуються стабілітрони VD1 і VD2. Далі обробка сигналів виконується безпосередньо в мікроконтролері за заданим алгоритмом.

У системі застосовано мікроконтролер серії AVR AT90S4433 виробництва компанії ATMEL, який забезпечує надійну роботу і точну обробку інформаційних сигналів. Основні параметри контролера включають: точність АЦП, тактову частоту, обсяг внутрішньої пам'яті та можливість програмного керування сигналами для забезпечення стабільного функціонування системи.

Контролер забезпечує підтримку стабільної температури шару в грануляторі-сушарці шляхом реалізації відповідної схеми регулювання.

Живлення контролера подається в діапазоні 3-5 В: +5 В підключається до 7-го виводу, а -5 В – до відповідного контакту. Опорна частота задається кварцовим резонатором ZQ1 на значення 4,000 МГц, а конденсатори C19 і C20 полегшують запуск внутрішнього тактового генератора.

У ланцюзі скиду (RESET, вивід 1) передбачені додаткові елементи для підвищення надійності роботи схеми. Резистор R16 встановлює логічний рівень "1" на вході скиду, а конденсатор C23 зменшує ймовірність випадкового перезавантаження через електричні перешкоди.

Контролер містить EEPROM (електрично перепрограмовану пам'ять), яка може некоректно функціонувати при нестабільній напрузі живлення, що призводить до довільного перезапису комірок і непрацездатності програми. Для запобігання таким проблемам застосовано мікросхему супервізора живлення DD2 DS1813 компанії DALLAS.

Принцип роботи супервізора полягає в поступовому підвищенні напруги живлення при включенні, і поки вона не досягне 4,8 В, на вході RESET контролера утримується логічний рівень "1", що забороняє запуск. Під час роботи супервізор контролює стабільність живлення і в разі падіння

або стрибка напруги автоматично скидає контролер, підтримуючи захист програми та забезпечуючи безперервну роботу системи.

Контролер можна програмувати безпосередньо в схемі за допомогою SPI-інтерфейсу, який реалізований через 6-контактний роз'єм XS4. Для програмування використовуються такі виводи мікросхеми: SCK – 19-й контакт, MISO – 18-й, MOSI – 17-й, RST – 1-й контакт.

Порт PD призначений для виведення даних на рідкокристалічний дисплей HG1. Контрастність дисплея регулюється резистором R19, а кнопками SA2 та SA3 здійснюється переміщення рядка індикатора вгору та вниз. Дисплей живиться від напруги +5 В.

Для керування нагрівальним елементом керуючий сигнал подається на підсилювач, виконаний на транзисторі VT2. Навантаженням підсилювача виступає оптопара АОУ103, яка забезпечує гальванічне розв'язування мікроконтролерного блоку та блоку управління калорифером. Сигнал з виходу оптопари надходить на підсилювач VT3, а потім підсилюється по потужності транзистором VT4. Підсилений сигнал з колектора VT4 подається на електромагніт. Живлення електромагніту здійснюється напругою 36 В, для чого в блоці живлення використано параметричний стабілізатор на резисторі R12 та стабілітронах VD8-VD10. Транзистор VT1 призначений для додаткового підсилення потужності цієї напруги, забезпечуючи надійну роботу електромагнітного пристрою.

## 4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність системи

### 4.1 Аналіз впливу частоти обертання ротора на ККД агрегату

Для встановлення залежності вихідної продукції гранулювання від режимних параметрів процесу та частоти обертання ротору проведено дробно-факторний експеримент типу  $2^3-1$  [16]. У розрахунках при цьому вирішено не враховувати вплив додаткових факторів.

Виходячи з фізичної моделі процесу, визначено такі параметри для варіювання:

- частота обертання ротору  $n$ , об/хв – X1;
- еквівалентний діаметр частинок в шарі  $D_e$ , мм – X2;
- температура газів на вході в установку  $T_{ex}$ , град – X3

Межі варіювання величин приведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Межі варіювання величин

Величина	Фактор		
	X1	X2	X3
Основний рівень	2750	2,57	204
Межі варіювання	±750	±0,53	±22,5

В якості цільової функції, або функції відгуку, обрано величину виходу гранульованого продукту  $n$ . Експерименти виконуються за матрицею, наведеною в табл.4.2.

Кожен експериментальний пункт плану повторюється тричі для підвищення точності вимірювань. Послідовність виконання точок плану формується з використанням таблиці випадкових чисел, що забезпечує випадковість порядку проведення дослідів.

Встановлено залежність виходу готового гранульованого продукту від змін параметрів технологічного процесу, що дозволяє визначити оптимальні умови для підвищення ефективності виробництва.

$$\hat{\eta} = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3$$

Таблиця 4.2 - Результати запланованого експерименту

№ серії	X1, $n$ , об/хв			X2, $D_e$ , мм			X3, $T_{ex}$ , °C			сер. $\eta$	
	Код	Значення	Середнє	Код	Значення	Середнє	Код	Значення	Середнє	Значення	Середнє
1	+	3500	3500	-	1,94	2,01	-	186	182,7	93,2	92,3
	+	3500		-	2,03		-	182		96,3	
	+	3500		-	2,06		-	180		86,9	
2	-	2000	2000	+	3,18	3,21	-	181	181,7	73,8	85,3
	-	2000		+	3,05		-	182		90,6	
	-	2000		+	3,4		-	182		85,5	
3	-	2000	2000	-	2,48	2,53	+	227	228	75,6	78,9
	-	2000		-	2,44		+	228		80,2	
	-	2000		-	2,68		+	229		80,9	
4	-	3500	3500	-	2,68	2,73	-	226	227,3	84,2	79
	-	3500		-	2,53		-	226		77,1	
	-	3500		-	3,99		-	230		77,1	

Алгоритм розрахунку:

1. Обчислюємо середнє значення вихідного показника готового продукту за результатами  $m$  паралельних експериментів

$$\bar{\eta}_i = \frac{\sum_{u=1}^m \eta_{iu}}{m}, \quad (4.1)$$

де  $i$  – номер дослідів;  $u$  – номер паралельного дослідів серії;  $\eta_{iu}$  – дійсне, виміряне в досліді, значення виходу готового продукту.

2. Визначаємо вибірккову дисперсію результатів експериментів

$$S_i^2 = \frac{\sum_{u=1}^m (\eta_{iu} - \bar{\eta}_i)^2}{m-1} . \quad (4.2)$$

3. Перевіряємо відтворюваність дослідів за критерієм Кохрена

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2} , \quad (4.3)$$

де  $S_{\max}$  – максимальне значення з вибірових дисперсій експерименті;  $N$  – кількість режимів.

Отримане значення порівнюється з табличним значенням критерію Кохрена  $G_T$ , визначеним для рівня значущості ( $p=0,05$ ) та ступенів свободи  $f_1=m-1$  і  $f_2=N$ . Якщо виконується умова  $G_T > G$ , дисперсії вважаються однорідними, а результати експериментів – відтворюваними. У протилежному випадку слід провести повторне виконання дослідів.

4. Коефіцієнти регресійного рівняння обчислюються за відповідною формулою

$$B_i = \frac{\sum_{j=1}^N (x_{ji} \eta_j)}{N} . \quad (4.4)$$

5. Вибіркова дисперсія відтворюваності по середній дисперсії дослідів

$$S_{\text{відтв}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N} . \quad (4.5)$$

з числом ступенів свободи  $f_{\text{відтв}}=(m-1)N$ .

Дисперсія середнього значення, обчисленого на вибірці розміром  $m$ , зменшується у  $m$  разів порівняно з дисперсією окремого одиничного вимірювання

$$S_{\eta_i}^2 = \frac{S_{\text{відтв}}^2}{m} . \quad (4.6)$$

Дисперсія коефіцієнтів

$$S_{\text{ex}}^2 = \frac{S_{\text{відтв}}^2}{m} . \quad (4.7)$$

6. Перевіряємо значущість коефіцієнтів рівняння регресії за критерієм Стьюдента

$$t_j = \frac{|B_j|}{S_B} \quad (4.8)$$

Проводиться порівняння значення  $t_j$  із табличним критерієм  $t_T$ , визначеним для рівня значущості  $p=0,05$  та числа степенів свободи  $f=(m-1)N$ .

Якщо  $t_T > t_j$ , приймається гіпотеза про рівність нулю генерального коефіцієнта регресії  $B_j=0$ , і відповідний коефіцієнт  $B_j$  вважається статистично незначущим та виключається з рівняння регресії. Через ортогональність матриці планування значущі коефіцієнти, що залишилися, не потребують перерахунку.

Адекватність побудованого рівняння регресії для експериментальних даних перевіряється з використанням критерію Фішера, що дозволяє оцінити відповідність моделі спостережуваним результатам.

Дисперсія адекватності

$$S_{ad}^2 = \frac{m \sum_{i=1}^N (\bar{\eta}_i - \hat{\eta}_i)^2}{N-1}, \quad (4.9)$$

де  $m$  – число значущих коефіцієнтів рівняння регресії.

Значення критерію Фішера

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{відтв}^2} \quad (4.10)$$

Отримане значення  $F_T$  порівнюють із табличним значенням  $F$ , визначеним для рівня значущості  $p=0,05$ , чисел степенів свободи дисперсії адекватності  $f_1=N-1$  та дисперсії відтворюваності  $f_2=(m-1)N$ . Якщо  $F_T$  перевищує  $F$ , опис вважається адекватним; у протилежному випадку доцільно підвищити порядок апроксимуючого полінома.

Результати експериментів та обчислень, виконаних за наведеною методикою, наведено в табл.4.3.

Отримано регресійне рівняння

$$\hat{\eta} = 84.05 + 1.95x_1 - 4.75x_3 \quad (4.11)$$

або

$$\hat{\eta} = 84.05 + 2.6 \cdot 10^{-3}(n - 2750) - 0.21(T_{ax} - 204) \quad (4.12)$$

Еквівалентний діаметр частинок у шарі  $D_e$  фактор  $X_2$  не має суттєвого впливу на вихід готового продукту в межах розглянутого діапазону параметрів. Це підтверджено перевіркою значущості коефіцієнтів рівняння регресії за критерієм Стюдента:  $t_2=1,71 < t_T=1,86$ , де табличне значення  $t_T=1,86$  визначено для ймовірності  $p=0,05$  та степенів свободи  $\gamma = N(m-1)=4(3-1) = 8$ .

Таблиця 4.3 - Перевірка відтворюваності дослідних даних за критерієм Кохрена

№	$\eta_{ie}$	$\bar{\eta}_{ie}$	$\eta_{ie} - \bar{\eta}_{ie}$	$(\eta_{ie} - \bar{\eta}_{ie})^2$	$\Sigma(\eta_{ie} - \bar{\eta}_{ie})^2$	$S_i^2 = \frac{1}{m-1} \Sigma(\eta_{ie} - \bar{\eta}_{ie})^2$
1	86,3	88,5	-2,2	4,84	8,33	4,165
	90,3		1,8	3,24		
	89		0,5	0,25		
2	79,8	85,3	-5,5	30,25	58,38	29,190
	90,6		5,3	28,09		
	85,5		0,2	0,04		
3	77,1	74,2	2,9	8,41	12,99	6,495
	72,9		-1,3	1,69		
	72,5		-1,7	2,89		
4	84,2	79,7	4,5	20,25	31,01	15,506
	77,1		-2,6	5,76		
	77,7		-2	4		

Результати експериментів є відтворюваними, що підтверджується критерієм Кохрена:  $G=0,3716 < G_T=0,711$ , де  $G_T$  визначено для степенів свободи  $f_1=m-1 = 2$ ,  $f_2=N=4$  та рівня ймовірності  $p=0,05$ .

Отримане рівняння регресії адекватно описує процес: значення критерію Фішера  $F=0,327$  значно менше табличного  $F_T=9,12$ , визначеного для  $f_1=N-m=1$ ,  $f_2=N(m-1)=8$  при ймовірності  $p=0,05$ . Це свідчить про статистичну достовірність моделі та її відповідність експериментальним даним.

Аналіз рівняння (4.12) у заданому діапазоні зміни параметрів показує, що для підвищення виходу готового продукту доцільно збільшувати оберти ротора, що відповідає зростанню лінійної швидкості, з якою плівка відводиться з поверхні обертового елемента. Це призводить до зменшення товщини плівки та, як наслідок, розміру крапель розпилюваної рідини. Подібна залежність підтверджується й спостереженням оберненої реакції на зміну температури

входу: її зменшення знижує навантаження на ротор і зменшує товщину плівки, що відокремлюється від поверхні.

Однак така обернена залежність виходу готового продукту від температури входу не повністю узгоджується з фізичною моделлю процесу, тому необхідно виділити параметр, який відображає гідродинамічні властивості процесу та здатен коригувати цю залежність, тобто уточнити математичну модель.

З цією метою проведено додатковий плануючий експеримент, у якому в якості факторів запропоновано наступні:

- частота обертання ротора  $n$ , об/хв – X1;
- гідравлічний опір шару  $\Delta P_{ш}$ , мм.рт.ст. – X2;
- температура газів на вході в установку  $T_{вх}$ , град – X3.

Гідравлічний опір шару, подібно до еквівалентного діаметра, описує гідродинамічні властивості шару, але значно простіше контролювати його під час експериментальних досліджень, оскільки  $De$  через кінетичні особливості процесу є параметром, який швидко змінюється.

Межі варіювання величин приведені в табл.4.4.

Таблиця 4.4 - Межі варіювання величин

Величина	Фактор		
	X1	X2	X3
Основний рівень	2750	235	204
Межі варіювання	$\pm 750$	$\pm 25$	$\pm 22,5$

В якості цільового показника прийнято величину виходу гранульованого продукту  $\eta$ . Експериментальні дослідження виконано відповідно до матриці планування експерименту, наведеної у табл.4.2, що дозволяє систематично оцінити вплив факторів на результат.

Результати дослідження приведені в табл.4.5.

Таблиця 4.5 - Результати запланованого експерименту

№ серії	X1, $n$ , об/хв			X2, $\Delta P_{ш}$ , мм.рт.ст.			X3, $T_{ex}$ , °C			сер. $\eta$	
	Код	Значення	Середнє	Код	Значення	Середнє	Код	Значення	Середнє	Значення	Середнє
1	+	3500	3500	-	210	210	-	181	180,7	86,3	88,5
	+	3500		-	210		-	181		90,3	
	+	3500		-	210		-	180		89	
2	-	2000	2000	+	260	260	-	181	181,7	79,8	85,3
	-	2000		+	260		-	182		90,6	
	-	2000		+	260		-	182		86,5	
3	-	2000	2000	-	210	210	+	230	229,8	77,1	74,2
	-	2000		-	210		+	229,5		72,9	
	-	2000		-	210		+	230		72,5	
4	-	3500	3500	-	260	260	-	226	227,3	84,2	79,7
	-	3500		-	260		-	226		71,7	
	-	3500		-	260		-	230		77,1	

Обробку результатів проводимо по вищевикладеній методиці.

Отримане рівняння регресії має вигляд

$$\hat{\eta} = 81.925 + 2.175x_1 - 4.975x_3 \quad (4.13)$$

або

$$\hat{\eta} = 81.925 + 2.9 \cdot 10^{-3}(n - 2750) - 0.216(T_{ex} - 205) \quad (4.14)$$

Фактор X2 має незначний вплив на вихід готового продукту, оскільки значення критерію Стюдента для нього становить  $t=0,92$ , що менше за табличне значення при ймовірності  $p=0,05$  і ступені свободи  $\nu=8$ . Це свідчить передусім про недостатню ефективність перемішування в ПШ, яка зумовлена конструктивними особливостями газорозподільного пристрою.

Отримані коефіцієнти рівняння регресії підтверджують висновки попередньої моделі щодо залежності виходу готового продукту від числа обертів ротора та температури на вході, що характерно для даної конструкції обертового механізму.

Таким чином, вектор цільової функції (вихід готового продукту) у дослідженому просторі параметрів спрямовується у бік збільшення обертів ротора та зменшення подачі розчину на нього, тобто в напрямку зменшення товщини плівки розчину на кромці диску ротора. Досягнення цієї мети можливе

шляхом збільшення числа дисків або підвищення лінійної швидкості кромки диску.

Найбільш ефективним заходом є збільшення діаметра ротора, що прямо пропорційно впливає на лінійну швидкість. Водночас, щоб не порушити гідродинаміку шару і не погіршити умови протікання кінетики процесу, доцільно зменшувати товщину плівки за рахунок додаткових дисків, зберігаючи абсолютну лінійну швидкість у межах оптимального діапазону 12–15 м/с.

#### **4.2 Визначення математичної моделі керованого об'єкта**

У науковій літературі щодо ідентифікації [17, 18] описано широкий спектр методів: детерміновані та стохастичні, строгі (математично обґрунтовані) та евристичні, параметричні й непараметричні, оптимальні за абстрактними точнісними критеріями або орієнтовані на конкретні завдання (керування, прогнозування, контроль, діагностика тощо), квазіоптимальні для широкого класу статистичних характеристик сигналів (робастні) та оптимальні лише за суворо визначених умов, апіорі задані або адаптивні, і так далі.

Для ефективного використання цих методів необхідно виділити ключові принципи та якісні критерії, яким повинна відповідати математична модель і алгоритм її ідентифікації щодо реального об'єкта – процесу грануляції. Це дозволяє забезпечити точність моделювання, адекватність реакції на зміни параметрів і надійність прогнозів у практичних умовах.

Модель динаміки розробляється для керування внутрішніми параметрами процесу шляхом регулювання зовнішніх, або вхідних, змінних. До вхідних змінних належать: струм нагрівача  $I$ , тиск на вході  $P_{вх}$ , витрати розчину  $Q$ , перепад тиску в шарі  $\Delta P_{ш}$ . Спостережувані внутрішні змінні включають: температуру шару  $T_{ш}$ , висоту шару  $H_{ш}$ , концентрацію розчину, коефіцієнт розвантаження, хімічний склад та інші параметри. З переліку вхідних змінних, які найбільше впливають на якість кінцевого продукту, як керуючі було обрано струм нагрівача  $I$ , тиск на вході  $P$  та витрати розчину  $Q$ . Керованою змінною обрана температура шару  $T_{ш}$ .

Для спрощення моделі вхід-вихід аперіодичної ланки високого порядку, якою є канал «струм–температура» апарату, застосовується метод заміни передаточної функції з  $n$  постійними часу  $T$  на більш просту еквівалентну аперіодичну ланку нижчого порядку. Такий підхід дозволяє зменшити складність розрахунків, зберігаючи адекватність моделі для задач автоматичного керування і регулювання температури шару

$$W(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) \dots (T_n p + 1)} \quad (4.15)$$

узагальненою функцією вигляду

$$W(p) = \frac{k}{(T p + 1)^n} \quad (4.16)$$

Оператор (4.15) можна апроксимувати наближеною функцією. У цьому випадку замість визначення  $(n+1)$  невідомих параметрів оператора достатньо обчислити два ключові параметри  $k$  та  $T$ , як зазначено у формулі (4.16). Порядок  $n$  вибирається на підставі форми перехідної функції або за принципом раціонального ускладнення [20, 21], починаючи від  $n=1$  і вище. Для каналу регулювання «струм–температура» оптимальним є порядок  $n=2$ .

#### 4.2.1 Ідентифікація оператора струм-температура

При постійному тиску  $P$  і витраті  $Q$  температура шару  $T_w$  змінюється з часом унаслідок стрибкоподібних коливань струму нагрівача.

На рис. 4.1 наведено графіки зміни струму нагрівача (два стрибки збільшення та два зменшення) і відповідної температури шару в діапазоні 20°-60°C. На рис. 4.2 аналогічні графіки показані для інтервалу 65°-85°C, проте без стрибків зменшення струму. При збільшенні потужності нагрівача шляхом підключення додаткових секцій спостерігаються додаткові імпульси струму (пунктиром), що виникають через залежність опору нагрівальної спіралі від її температури: холодна спіраль спочатку має менший опір, ніж розігріта після деякого часу, тому при незмінній напрузі струм зростає.

У табл.4.6–4.11 наведено числові значення часу та температури шару, що відповідають графікам на рис. 4.1 та 4.2, для зручності порівняння та аналізу динаміки процесу нагріву.

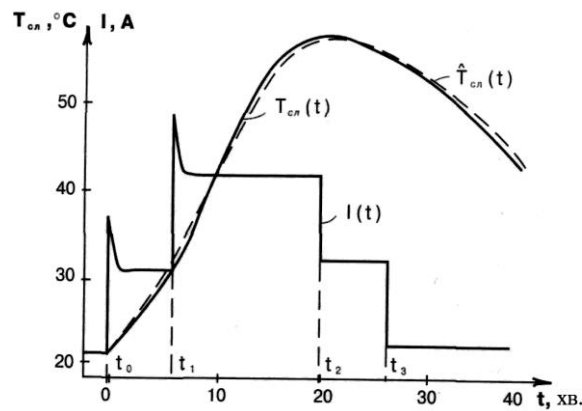


Рисунок 4.1 – Графіки перехідних процесів  $T_w(t)$ ,  $I(t)$  в діапазоні  $T_w=20\div 60^\circ\text{C}$

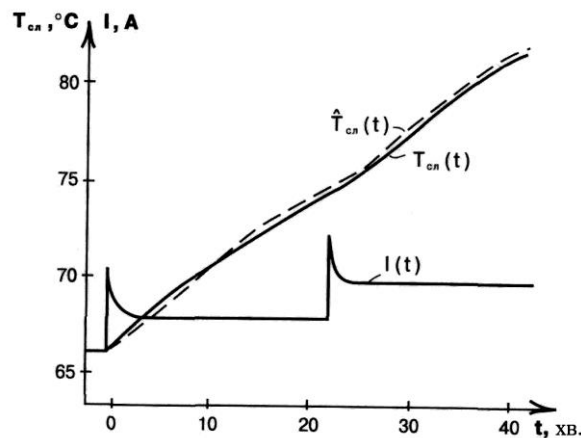


Рисунок 4.2 – Графіки перехідних процесів  $T_w(t)$ ,  $I(t)$  в діапазоні  $T_w=65\div 90^\circ\text{C}$

Таблиця 4.6 - I інтервал  $t \in [t_0, t_1]$

$t$ , XB	0	0,5	1,5	3	4	5
$T_w$ , °C	21	22	23	26	27,5	28,5

Таблиця 4.7 - II інтервал  $t \in [t_1, t_2]$

$t$ , XB	6	6,5	7,5	9	10	11	13	14	15,5
$T_w$ , °C	30,5	32	34	38,5	42	45	50	52	55

Таблиця 4.8 - III інтервал  $t \in [t_2, t_3]$

$t$ , XB	16	16,5	17,5	19	20	21	23	24	25,5
$T_w$ , °C	56	56	57,5	57,5	57,5	57	56	55,5	55

Таблиця 4.9 - IV інтервал  $t \in [t_3, t_4]$

$t$ , XB	26	26,5	27,5	29	30	31	32	33	34	35
$T_w$ , °C	55	54,5	53,5	52	51,5	51	50	49	48	47,5

Таблиця 4.10 - V інтервал  $t \in [0, 20]$  хв]

$t$ , хв	0	2	4	9	12	18	20
$T_w$ , °C	66	67,5	68	70	72	73,5	74

Таблиця 4.11 - VI інтервал  $t \in [20, 40]$  хв]

$t$ , хв	20	21	24	27	30	33	35
$T_w$ , °C	74	75	76	77	78	79	80,5

Оскільки вхідною змінною прийнято вимірюваний струм нагрівача, а реакцією на нього виступає температура шару, то згідно з законом Джоуля-Ленца, ця залежність у статичному режимі повинна наближено описуватись квадратичною функцією. Через нелінійність функції  $T_w(I)$  впливає, що коефіцієнт підсилення  $k$  ланки (4.16) змінюється залежно від  $T_w$ .

У загальному випадку також слід врахувати, що узагальнена стала часу  $\tau$  у (4.16) може залежати від температури шару  $T_w$ .

Такі припущення визначають структуру моделі (4.16) у широкому діапазоні температур від 20 °C до 100 °C і дозволяють описати систему за допомогою моделі Гомерштейна, що враховує нелінійність динамічної реакції нагрівача на зміну струму та зміну параметрів ланки при різних температурних режимах

$$T^2(T_w) \frac{d^2 T_w}{dt^2} + 2T(T_w) \frac{dT_w}{dt} + T_w(t) = F(I(t)), \quad (4.17)$$

яка для кожної малої підобласті вимірювання температури може бути представлена лінеаризованою моделлю (3.16) у відхиленнях  $\Delta$

$$T^2 \frac{d^2 \Delta T_w}{dt^2} + 2T \frac{d\Delta T_w}{dt} + \Delta T_w(t) = k\Delta I(t), \quad (4.18)$$

де  $\Delta T_w = T_w - T_{w0}$ ,  $\Delta I = I - I_0$ ,  $k = \left. \frac{df(I)}{dI} \right|_{I_0}$ ,  $T = T(T_w)$ ,  $T_{w0}$ ,  $I_0$  – центри лінеаризації – початкові точки кожного інтервалу  $T_w$  (табл.4.6÷4.11).

### 4.3 Синтез автоматизованої системи виготовлення мінеральних добрив

Під структурною схемою системи автоматичного керування (САК) у теорії автоматичного управління розуміють графічне представлення математичної моделі системи у вигляді взаємопов'язаних типових елементів, що відображають функціональну структуру даної системи. Кожен елемент позначається прямокутником, у якому вказуються динамічні властивості ланки у формі передатної функції, часової характеристики або динаміки.

Передатною функцією називають відношення перетворень вихідної та вхідної величин при нульових початкових умовах. Для глибокого розуміння динаміки процесів у системі доцільно проаналізувати динамічні властивості об'єкта регулювання. Характеристики об'єкта та його динаміку можна визначити за допомогою передатної функції, що дозволяє отримати частотні характеристики і оцінити поведінку об'єкта у різних умовах експлуатації [22].

При формуванні структурної схеми САК використовувалися диференціальні рівняння окремих елементів. На основі літературних джерел були підібрані передатні функції для кожного елемента відповідно до функціональної схеми системи регулювання. Структурна схема наведена на рис. 4.3 і відображає взаємозв'язок усіх ланок системи.

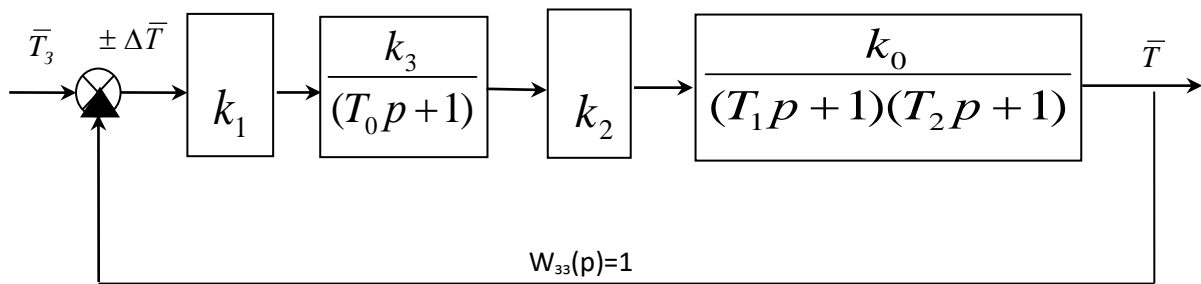


Рисунок 4.3 – Структурна схема САК процесом виготовлення мінеральних добрив

Щоб визначити передаточну функцію об'єкта, збурююче вплив  $f$  прийнято рівним нулю, оскільки метою є отримання функції за керуючим сигналом.

Передаточні функції окремих елементів схеми визначено шляхом застосування прямого перетворення Лапласа, що дозволяє представити динаміку системи у частотній області та спростити подальший аналіз.

$W_{BB}(p) = k_I$  – передаточна функція вимірювального блока;

$W_{МК}(p) = \frac{k_3}{(T_0 p + 1)}$  – передаточна функція мікроконтролера;

$W_o(p) = \frac{\bar{X}_{вх}}{\bar{X}_{вх}} = \frac{k_0}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}$  - узагальнену передаточну функцію об'єкта;

$W_{III}(p) = k_2$  – передаточна функція підсилювача потужності;

де  $p$  – оператор Лапласа.

Для нашої системи є наступні вихідні дані:

$$T_0 = 35 \text{ с}; \quad T_1 = 4000 \text{ с}; \quad T_2 = 2,5 \text{ с};$$

$$k_0 = 40; \quad k_1 = 0,5; \quad k_2 = 10; \quad k_3 = 1.$$

Компоненти структурної схеми САК розташовані в послідовному порядку, тому для визначення передаточної функції розімкненої системи необхідно виконати добуток передаточних функцій усіх складових елементів

$$W_p(p) = W_{BB}(p) \cdot W_{МК}(p) \cdot W_{III}(p) \cdot W_o(p) = \frac{k_1 k_2 k_3 k_0}{(T_0 p + 1)(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \quad (4.19)$$

Після підстановки визначених значень коефіцієнтів підсилення окремих елементів системи можна визначити загальний коефіцієнт підсилення розімкненої системи

$$k = k_1 k_2 k_3 k_0 = 200 \quad (4.20)$$

Тоді передаточна функція розімкненої системи матиме вигляд

$$W_p(p) = \frac{k}{(T_0 p + 1)(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \quad (4.21)$$

Передаточна функція замкнутої системи, з врахуванням того, що  $W_{зз}(p) = 1$ , розраховується за формулою

$$W_3(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{k}{(T_0 p + 1)(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) + k} \quad (4.22)$$

Характеристичне рівняння має вигляд

$$T_0 T_1 T_2 p^3 + (T_1 T_2 + T_0(T_1 + T_2))p^2 + (T_0 + T_1 + T_2)p + k + 1 = 0 \quad (4.23)$$

Для побудови амплітудно-фазової частотної характеристики розімкненої системи слід у передавальній функції здійснити заміну параметра (частота),

визначити її дійсну та уявну складові, а потім, змінюючи частоту від нуля до нескінченності, відобразити відповідні значення на графіку

$$W_p(j\omega) = \frac{k}{(T_1 j\omega + 1)(T_2 j\omega + 1)(T_0 j\omega + 1)} = \frac{k}{-jT_0 \cdot T_1 \cdot T_2 \omega^3 - (T_1 \cdot T_2 + T_0(T_1 + T_2)) \cdot \omega^2 + j(T_0 + T_1 + T_2) \cdot \omega + 1}$$

$$= \frac{k}{(1 - (T_1 \cdot T_2 + T_0(T_1 + T_2)) \cdot \omega^2) + j((T_0 + T_1 + T_2) \cdot \omega - T_0 \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot \omega^3)}$$

Отже, підставивши значення коефіцієнтів і сталих часу, отримаємо

$$P(\omega) = \frac{k(1 - (T_1 \cdot T_2 + T_0(T_1 + T_2)) \cdot \omega^2)}{(1 - (T_1 \cdot T_2 + T_0(T_1 + T_2)) \cdot \omega^2)^2 + ((T_0 + T_1 + T_2) \cdot \omega - T_0 \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot \omega^3)^2}; \quad (4.24)$$

$$Q(\omega) = \frac{-k \cdot ((T_0 + T_1 + T_2) \cdot \omega - T_0 \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot \omega^3)}{(1 - (T_1 \cdot T_2 + T_0(T_1 + T_2)) \cdot \omega^2)^2 + ((T_0 + T_1 + T_2) \cdot \omega - T_0 \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot \omega^3)^2}. \quad (4.25)$$

Після виконання зазначених перетворень, із застосуванням можливостей математичного пакета Matcad побудовано графік амплітудно-фазової частотної характеристики, представлений на рис.4.4.

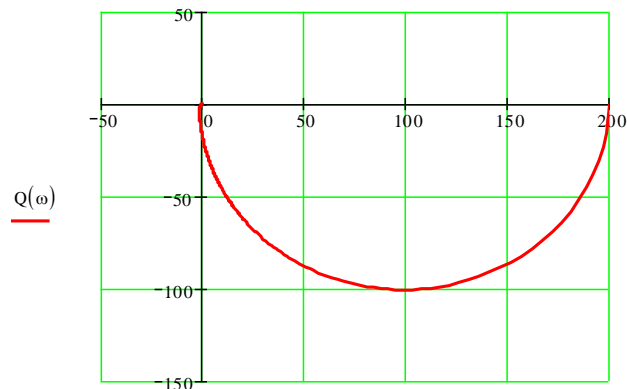


Рисунок 4.4 – АФЧХ розімкнутої системи

Для побудови асимптотичної логарифмічної амплітудно-частотної характеристики (ЛАЧХ) насамперед необхідно визначити сполучні частоти, виходячи зі сталих часу окремих динамічних елементів системи.

$$\omega_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{4000} = 0,00025 \text{ с}^{-1}, \text{ належить аперіодичній ланці};$$

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{35} = 0,0286 \text{ с}^{-1}, \text{ належить аперіодичній ланці};$$

$$\omega_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{2,5} = 0,4 \text{ c}^{-1}, \text{ належить аперіодичній ланці.}$$

Спрягаючі частоти відзначають на осі частот у логарифмічному масштабі. Низькочастотна асимптота логарифмічної амплітудно-частотної характеристики (ЛАЧХ) при малих частотах є прямою з нахилом 0 дБ/дек, оскільки система не містить інтегруючих динамічних ланок.

Ця пряма, або її продовження при частоті  $\omega = 1$  рад/с, має ординату  $20 \cdot \lg k = 46$  дБ (де  $k = 200$  – коефіцієнт підсилення розімкнутої системи).

Після проходження кожної спрягаючої частоти нахил ЛАЧХ змінюється на -20 дБ/дек відносно попереднього значення, оскільки ці частоти відповідають аперіодичним динамічним ланкам першого порядку.

Високочастотна асимптота ЛАЧХ, тобто частина характеристики при значно більших частотах, має нахил -60 дБ/дек. Побудований графік ЛАЧХ наведено на рис.4.5.

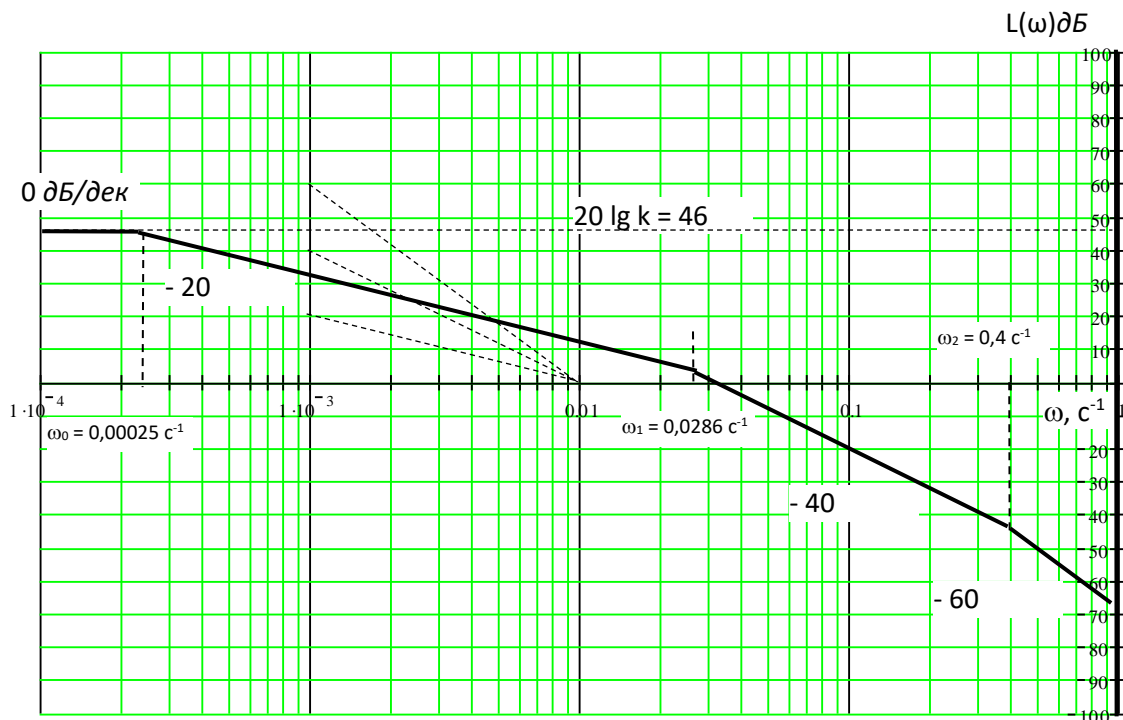


Рисунок 4.5 – ЛАЧХ розімкнутої системи  $L(\omega)$ .

ЛФЧХ одноконтурної розімкнутої системи визначається шляхом послідовного сумування ординат фазових характеристик стандартних типових ланок

$$\phi(\omega) = (-\arctg(\omega T_0) - \arctg(\omega \cdot T_1) - \arctg(\omega T_2)) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (4.26)$$

За отриманими значеннями будемо ЛФЧХ розімкнутої системи (рис. 4.6).

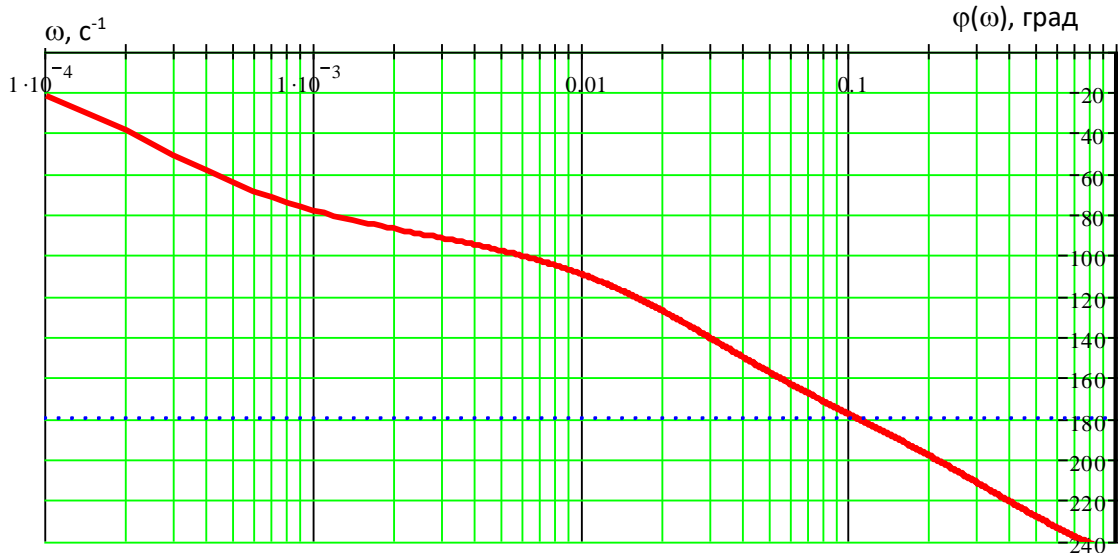


Рисунок 4.6 – ЛАЧХ розімкнутої системи

#### 1. Аналіз стійкості системи за допомогою критерію Гурвіца.

Відповідно до зазначеного критерію умови стійкості системи формулюються наступним чином. Усі корені характеристичного рівняння матимуть від'ємні дійсні частини за умови, що при додатних значеннях усіх коефіцієнтів головний визначник Гурвіца  $\Delta$  буде додатнім, а його діагональні мінори залишаються більше нуля. Після підстановки конкретних значень коефіцієнтів та сталих часу отримаємо

$$T_0 T_1 T_2 p^3 + (T_1 T_2 + T_0(T_1 + T_2))p^2 + (T_0 + T_1 + T_2)p + k + 1 = 0$$

$$350000p^3 + 150087,5p^2 + 4037,5p + 201 = 0$$

$$\Delta := \begin{vmatrix} (T_1 \cdot T_2 + T_0 \cdot T_1 + T_0 \cdot T_2) & 201 \\ T_0 \cdot T_1 \cdot T_2 & T_0 + T_1 + T_2 \end{vmatrix}$$

$$\Delta = 5.356 \times 10^8$$

Беручи до уваги, що головний визначник, сформований за правилом обчислення визначників Гурвіца для всіх додатних коефіцієнтів, має позитивні

значення  $\Delta = 5,356 \times 10^8 > 0$ , робимо висновок, що система відповідає критерію стійкості Гурвіца та є стійкою.

2. Досліджено стійкість системи та визначено її запас стійкості за модулем і фазою, використовуючи частотний критерій Найквіста-Михайлова.

За цим критерієм оцінка стійкості замкнутої системи автоматичного регулювання здійснюється на основі амплітудно-фазової частотної характеристики розімкнутої стійкої системи.

Отже, відповідно до критерію Найквіста-Михайлова система є стійкою, при цьому запас стійкості за модулем становить  $Z_m = 0,86$ , а за фазою –  $Z_\phi = 36^\circ$  (рис. 4.7).

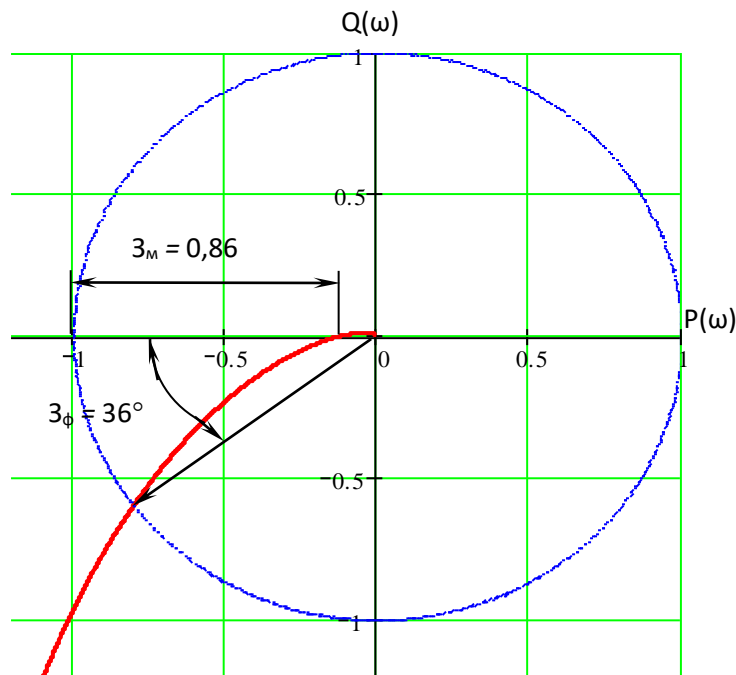


Рисунок 4.7 – Визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова.

3. Дослідження стійкості системи та визначення області її стійкості проведено за методом D-розбиття в площині одного параметра.

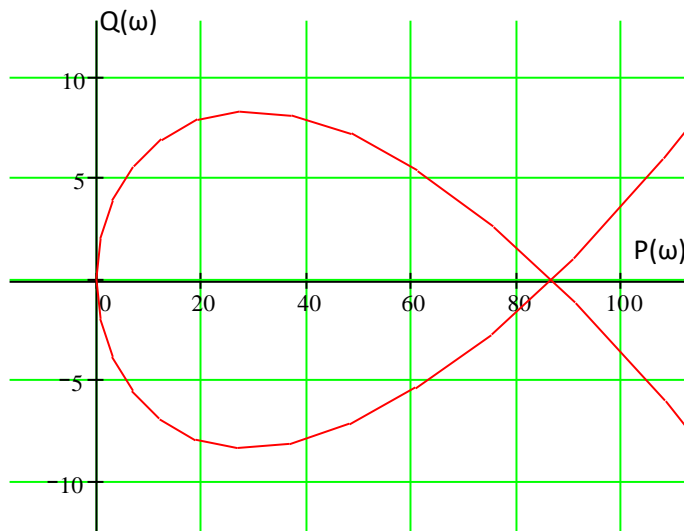
Побудуємо область стійкості у площині параметра  $k_3$ , оскільки його легко регулювати шляхом зміни коефіцієнта підсилення підсилювача потужності.

Використовуючи характеристичне рівняння системи, перепишемо його у вигляді функції від  $k_3$ , що дозволяє визначити межі допустимих значень цього параметра

$$K(s) = - \frac{(T_0 T_1 T_2 p^3 + (T_0 T_1 + T_0 T_2 + T_1 T_2) p^2 + p(T_0 + T_1 + T_2) + 1)}{k_0 k_1 k_2} \quad (4.27)$$

Побудуємо криву D-розбиття в площині параметру  $k_3$  при зміні частоти від  $-\infty$  до  $+\infty$  (рис. 4.8).

Рисунок 4.8 – D-розбиття в площині параметра  $k_3$ .



З побудованої області стійкості визначено критичне значення коефіцієнта  $k_3$ , яке у даному випадку становить  $k_{3кр}=86$ . З огляду на це, встановлене значення  $k_3=10$  перебуває всередині зони стійкості, тому для подальших розрахунків залишаємо  $k=10$ .

Оцінка ефективності регулювання замкненої системи автоматичного керування здійснюється через визначення запасу стійкості за модулем та фазою, а також частоти зрізу. Для розрахунку цих параметрів будуються ЛАЧХ і ЛФЧХ розімкненої системи, при цьому виконують їх коректне взаємне розташування для наочності та точності аналізу (рис. 4.9).

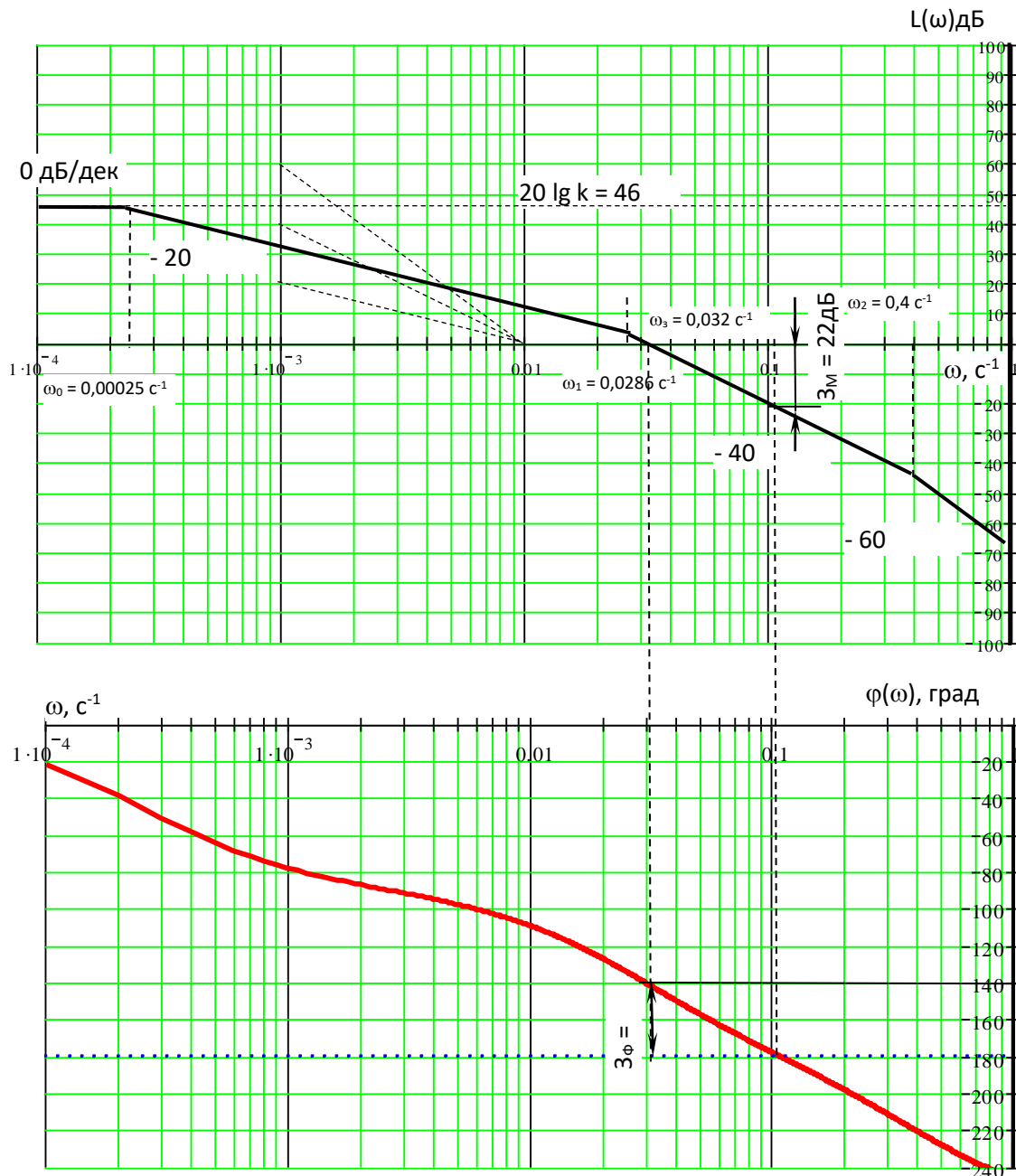


Рисунок 4.9 – Оцінка якості регулювання замкнутої САК по ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи

З цієї побудови визначено наступні параметри: частота зрізу  $\omega_3=0,032\text{c}^{-1}$ , що дозволяє обчислити час регулювання системи при жорстких умовах; запас стійкості по амплітуді  $Z_M \approx 22\text{дБ}$ ; запас стійкості по фазі  $Z_\varphi \approx 40^\circ$ .

На основі отриманих значень можна оцінити динамічні властивості системи та її поведінку при впливі зовнішніх збурень, а також передбачити ефективність регулювання в умовах змінного навантаження.

Використовуючи залежність у середовищі математичного редактора Matcad, виділено дійсну складову передаточної функції замкнутої системи та побудовано криву перехідного процесу (рис. 4.10). Аналіз графіка перехідного процесу дозволяє зробити висновок, що перехідний процес має аперіодичний характер з наявним перерегулюванням, а також дає змогу визначити основні числові показники якості роботи системи автоматичного керування (САК).

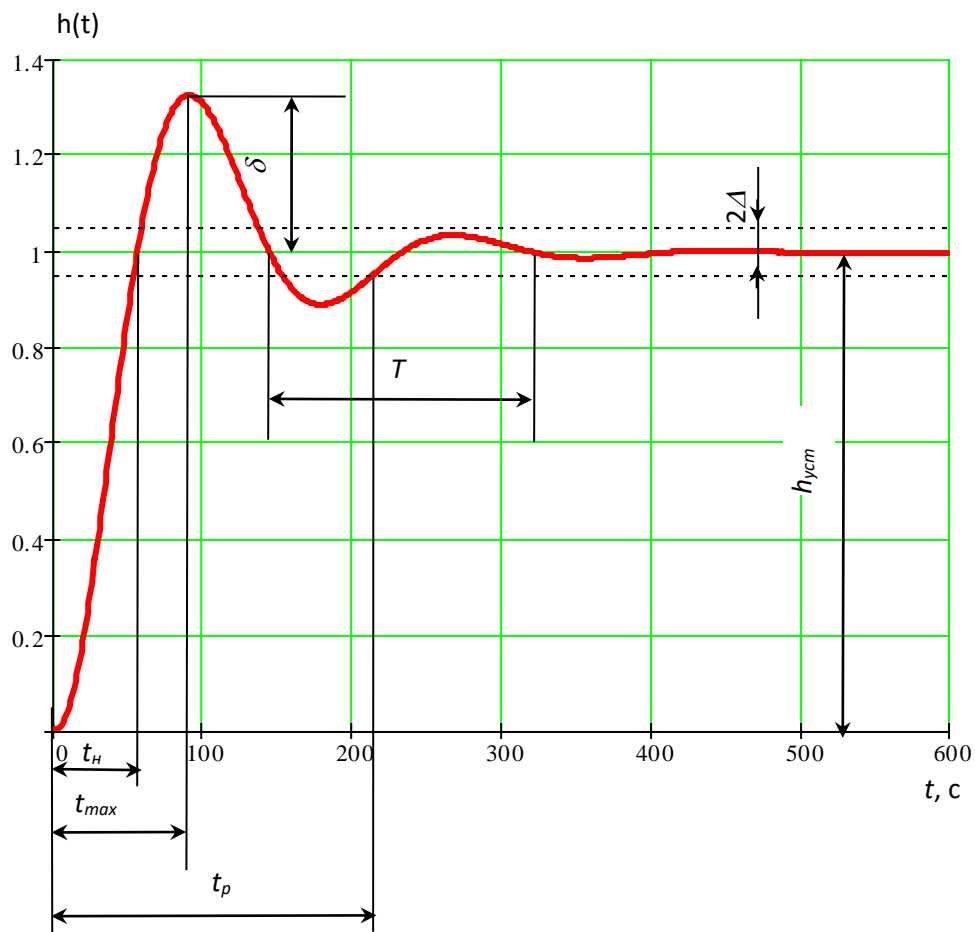


Рисунок 4.10 – Графік перехідного процесу вихідної системи

Час регулювання  $t_r=215c$  визначається як проміжок від початку дії вхідного впливу до моменту входження системи в зону  $2\Delta$ . Він залежить від швидкодії динамічних ланок і кількості таких ланок у головному контурі. Оскільки система має відповідати підвищеним вимогам до точності, цей показник як критерій для синтезу коректуючого пристрою доцільно зменшити на 25%, у результаті чого приймаємо  $t_r=161c$ .

- перерегулювання  $\delta = 32,5 \%$ ;

- частота коливань  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 0,038 \text{ c}^{-1}$ , де  $T = 164,3 \text{ c}$  – період коливань;
- кількість коливань перехідного процесу  $k = 1$ ;
- час досягнення першого максимуму  $t_{\max 1} = 92 \text{ c}$ ;
- час наростання перехідного процесу  $t_n = 57 \text{ c}$  визначає інтервал, за який вихідна величина досягає усталеного стану;
- декремент затухання перехідного процесу  $d = 3,1$  характеризує швидкість загасання коливань, відображаючи співвідношення амплітуд сусідніх пульсацій.

Таким чином, максимальне перерегулювання перевищує допустиме значення для технологічного процесу. Це свідчить про необхідність його зменшення під час синтезу оптимальної системи автоматичного регулювання, щоб забезпечити стабільність і точність регулювання параметрів. Синтез коректуючого пристрою САР виконується за логарифмічними амплітудно-частотними характеристиками. ЛАЧХ коректуючого пристрою визначається як різниця між бажаною та існуючою характеристиками. За формою отриманої ЛАЧХ обирається відповідна схема коректуючого пристрою, що дозволяє реалізувати необхідні параметри регулювання системи і забезпечити заданий запас стійкості на всьому діапазоні частот. За допомогою математичного редактора Matcad виділено дійсну частину передаточної функції замкнутої скорегованої системи та побудовано криву перехідного процесу (рис. 4.11). Аналіз графіка показує, що перехідний процес має монотонний характер, а час регулювання визначено як  $t_p = 48 \text{ c}$ .

На основі отриманої передаточної функції розраховано коректуючий пристрій, що дозволив скоротити час регулювання з 215 с до 48 с, а величину перерегулювання зменшити з 32,5 % до 0 %. Після впровадження корекції система стала стійкою, а перехідний процес, який раніше мав аперіодичний характер з перерегулюванням, набув монотонного характеру.

## ВИСНОВОК

Метою даної кваліфікаційної роботи було підвищення ефективності роботи технологічного агрегату при виробництві гранульованих мінеральних добрив.

У процесі виконання роботи проведено комплексний огляд процесів зневоднення та грануляції, у ході якого проаналізовано конструкції грануляторів псевдозрідженого шару та параметри, що безпосередньо впливають на продуктивність апарату. На підставі отриманих даних встановлено, що підтримання оптимальної температури шару сприяє суттєвому підвищенню продуктивності та покращенню якості готової продукції. На основі аналізу об'єкта регулювання спроектовано систему автоматичного контролю та підтримки температури псевдозрідженого шару.

Для реалізації автоматизованого регулювання температури було проаналізовано різні засоби вимірювання. Вибір датчика здійснювався з урахуванням компромісу між точністю вимірювань та простотою технічної реалізації. У результаті в якості основного сенсора для системи автоматизації обрана хромель-копелева термопара, що забезпечує надійне та стабільне визначення температури шару.

Для автоматичного підтримання заданого параметра створено мікропроцесорну систему, що забезпечує точне регулювання температури киплячого шару в грануляторі. Система складається з датчика температури, задавача параметра, вимірювальної схеми, мікропроцесорного керуючого пристрою та підсилювача потужності.

Проведено аналіз впливу частоти обертання ротора на коефіцієнт корисної дії агрегату, який показав, що оптимальним рішенням є збільшення діаметра ротора, що пропорційно підвищує лінійну швидкість. Водночас для збереження гідродинамічних властивостей шару та забезпечення сприятливих умов протікання кінетики процесу доцільно зменшувати товщину плівки шляхом

збільшення кількості дисків, підтримуючи абсолютне значення лінійної швидкості в межах 12-15 м/с.

Розроблено структуру системи, спроектовано її функціональну схему та принципову електричну схему. Для підтвердження працездатності проведено розрахунки стійкості, визначено запаси стійкості та здійснено синтез коректуючого пристрою, який скорочує час регулювання та зменшує перерегулювання в системі.

В розділі з охорони праці розраховано систему штучного освітлення у приміщенні чергових операторів.