

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет

Пояснювальна записка
до дипломної роботи
рівня вищої освіти «Магістр» на тему:

Обґрунтування конструкційних параметрів змішувача комбікорму

Виконав: студент 2 курсу, групи МГІЗ-1-23
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

_____ Качалов Олексій Вячеславович

Керівник: _____ Дудін Володимир Юрійович

Рецензент: _____ Потеруха Борис Тарасович

Дніпро 2024

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем
Рівень вищої освіти: «Магістр»
Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

ДОЦЕНТ

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«11» листопада 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Качалову Олексію Вячеславовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Обґрунтування конструкційних параметрів змішувача комбікорму

керівник роботи Дудін Володимир Юрійович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

« 11 » листопада 2024 року № 3769

2. Строк подання студентом роботи 16.12.2024 р. ..

3. Вихідні дані до роботи Аналіз стану питання процесів та обладнання для приготування комбікормів, зокрема змішувачів. Патентний пошук, аналіз літературних джерел, останніх досліджень з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Стан питання і завдання дослідження. 2. Теоретичні дослідження змішувача комбікормів. 3. Експериментальні дослідження лабораторного зразка змішувача. 4. Охорона праці. 5. Економічне обґрунтування розробленого змішувача комбікормів. Загальні висновки. Бібліографічний список

5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Мета і задачі досліджень. Аналіз (3 аркуші, А4). 2. Теоретичні дослідження (3 аркуші, А4). 3. Експериментальні дослідження (4 аркуші, А4). 4. Охорона праці (1 аркуш, А4). 5. Економічні показники (1 аркуш, А4). 6. Висновки (1 аркуш, А4)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-5	Дудін В.Ю., доцент		
Нормоконтроль	Івлєв В.В., доцент		

7. Дата видачі завдання: 11.11.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний (оглядовий)	до 01.10.2024 р.	
2	Теоретичний	до 20.10.2024 р.	
3	Експериментальний	до 09.11.2024р.	
4	Охорона праці	до 19.11.2024 р.	
5	Економічний	до 26.11.2024 р.	
6	Демонстраційна частина	до 30.11.2024 р.	

Студент

(підпис)

Качалов О.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Дудін В.Ю.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Качалов О.В. Обґрунтування конструкційних параметрів змішувача комбікорму /Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія». – ДДАЕУ, Дніпро, 2024.

Дипломна робота складається з п'яти основних розділів. У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми, визначено мету та завдання дослідження, а також наведено методи, які використовувалися у роботі. У першому розділі проведено аналіз сучасного стану питання змішування сипких кормів та визначено схему змішувача, що потребує вдосконалення. Другий розділ присвячено теоретичному моделюванню роботи змішувача, на основі чого обґрунтовано його технологічні, геометричні, кінематичні та силові параметри. У третьому розділі за допомогою лабораторних досліджень встановлено оптимальні співвідношення конструктивних та режимних параметрів для розробленої конструкції змішувача. Четвертий розділ містить аналіз конструкції змішувача з урахуванням вимог охорони праці. У п'ятому розділі виконано економічну оцінку розробленого змішувача комбікорму, що дозволяє оцінити його ефективність. У висновках сформульовано основні результати дослідження, наведено перелік використаних джерел та додатки для більш детального ознайомлення з матеріалами роботи.

Ключові слова: сипкі корми, змішувач, гвинт, потужність, однорідність змішування, питома енергоємність, питома експлуатаційні витрати.

ЗМІСТ

Вступ	8
1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	9
1.1 Аналіз способів і засобів змішування концентрованих кормів	9
1.2 1.2 Аналіз теоретичних досліджень процесу змішування концентрованих кормів	15
1.3 Мета роботи і задачі досліджень	20
1.4 Висновки	21
2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІШУВАЧА КОМБІКОРМІВ	22
2.1 Схема змішувача концентрованих кормів	22
2.2 Математична модель процесу змішування	24
2.3 Рівняння руху потоку частинок по лопатям механічного активатора	40
2.4 Висновки	43
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛАБОРАТОРНОГО ЗРАЗКА ЗМІШУВАЧА	44
3.1 Програма лабораторних досліджень	44
3.2 Методика експериментальних досліджень	46
3.3 Результати експериментальних досліджень	50
3.4 Висновки	58
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	59
4.1 Загальні вимоги охорони праці на комбікормових підприємствах	59
4.2 Інструкція з охорони праці при роботі зі змішувачем комбікорму	60

4.3 Висновки	63
5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОГО ЗМІШУВАЧА КОМБІКОРМІВ	64
5.1 Вихідні дані	64
5.2 Розрахунок показників економічної ефективності	65
5.3 Висновки	65
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	66
БІБЛІОГРАФІЯ	67
ДОДАТКИ	71

ВСТУП

В сучасних умовах розвитку агропромислового комплексу України комбікормова промисловість відіграє ключову роль у забезпеченні ефективного ведення тваринництва та птахівництва. Раціональне використання кормів, їх висока якість і рівномірність розподілу поживних речовин у кормових сумішах є важливими факторами для забезпечення стабільного приросту живої ваги та високої продуктивності сільськогосподарських тварин і птахів. У цьому контексті особливе значення має вдосконалення технологічного обладнання для виробництва комбікормів, зокрема змішувачів, які забезпечують однорідність кормових сумішей.

Шнекові змішувачі є одними з найбільш поширених типів обладнання, що використовуються для змішування комбікормів. Вони характеризуються простотою конструкції, високою продуктивністю та здатністю забезпечувати достатню однорідність сумішей при мінімальних енерговитратах. Проте для досягнення оптимальної роботи таких змішувачів необхідно враховувати вплив конструкційних і режимних параметрів на ефективність процесу змішування.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю обґрунтування оптимальних конструкційних параметрів шнекових змішувачів для підвищення їх продуктивності, зменшення енерговитрат і покращення якості готових комбікормів. Такий підхід сприятиме не лише зниженню собівартості продукції, а й підвищенню конкурентоспроможності вітчизняного виробництва комбікормів на міжнародному ринку.

Метою даної роботи є обґрунтування конструкційних параметрів шнекового змішувача для забезпечення високої ефективності процесу змішування комбікормів. Для досягнення цієї мети було поставлено завдання дослідити вплив конструктивних і технологічних параметрів шнекового змішувача на продуктивність, якість змішування та енергоємність процесу.

1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Аналіз способів і засобів змішування концентрованих кормів

Сучасні раціони для годівлі сільськогосподарських тварин мають відповідати двом основним вимогам: забезпечувати високий рівень калорійності та вміст поживних речовин, а також не спричиняти жодних негативних наслідків для здоров'я тварин. У зв'язку з цим виробництво комбікормів передбачає різноманітність їх форм, таких як рідкі, напіврідкі, тістоподібні та сухі сипучі корми.

Найбільш зручними та економічно вигідними для виготовлення є сухі сипучі концентровані корми. Вони мають кілька переваг, зокрема, тривалий термін зберігання без втрати якості, можливість використання компонентів із різною густиною та високі технологічні властивості кінцевої кормової суміші.

Існуючі змішувачі для комбікормів відрізняються значним конструктивним різноманіттям залежно від їх призначення та принципу роботи. Уніфікувати їх за єдиним критерієм складно, тому доцільно використовувати складну класифікацію, яка враховує низку конструктивних і технологічних показників. Зокрема, змішувачі розділяють на пристрої періодичної та безперервної дії.

Змішувачі періодичної дії мають меншу питому продуктивність, оскільки обмежений обсяг корму кілька разів циркулює в межах робочої камери. Хоча такі пристрої характеризуються вищими енерговитратами, вони забезпечують високу якість змішування, рівномірний розподіл мікродобавок і точне дозування компонентів.

Змішувачі безперервної дії, навпаки, мають вищу продуктивність, але якість отриманої кормової суміші дещо нижча через обмежений час взаємодії компонентів. Це ускладнює точний розподіл мікродобавок, тому такі змішувачі найкраще підходять для великих обсягів виробництва, де вимоги до однорідності не є пріоритетними.

Основними критеріями ефективності змішувачів є здатність працювати з компонентами різної вологості, рівень однорідності отриманої суміші, енергоефективність, зручність у використанні, можливість швидкої зміни параметрів процесу, наявність термічної обробки та надійність конструкції.

Змішувачі бувають з нерухомою або обертовою робочою камерою. У конструкціях із нерухомою камерою змішування здійснюється за рахунок обертання валів із лопатями чи шнеками. Водночас обертові камери забезпечують перемішування майже всього об'єму суміші без застійних зон, зменшуючи при цьому механічне подрібнення компонентів. Недоліком змішувачів із обертовими корпусами є складність конструкції, великі габарити та високі вимоги до приводу.

Енергоефективні гравітаційні змішувачі, що працюють під дією сили тяжіння, також знаходять застосування, однак вони характеризуються нижчою якістю змішування через обмежену взаємодію компонентів. Покращення роботи таких пристроїв можливе завдяки використанню вібрації або додаткових активних робочих органів.

Таким чином, ефективність змішувача залежить не лише від принципу його роботи, а й від конструктивних параметрів, таких як форма корпусу, кількість валів, швидкість обертання та спосіб розташування робочих органів. Оптимізація цих параметрів дозволяє досягти високої якості кормової суміші при мінімальних енерговитратах.

Найбільш відомим типом змішувача періодичної дії є модель СМ-2, зображена на рисунку 1.1. Конструкція цього пристрою включає циліндричний бункер, всередині якого вертикально встановлений вал із лопатями. У нижній частині вала розташований шків ремінної передачі, що приводиться в рух асинхронним електродвигуном потужністю 3 кВт. Основна перевага цієї моделі полягає в її простій конструкції, що забезпечує високу надійність у роботі. Однак є і недоліки: компоненти дозуються вручну, процес змішування є енерговитратним, а вивантаження готової суміші вимагає значних зусиль обслуговуючого персоналу.



Рисунок 1.1 – Змішувач CM-2

Для змішування продуктів із включенням преміксів або інших дрібнодисперсних компонентів розроблено змішувачі планетарного типу, наприклад, модель СПШ/20. Її загальний вигляд показано на рисунку 1.2 (а), а кінематична схема приводу – на рисунку 1.2 (б). Основний робочий орган –

шнек, який рухається складною траєкторією: обертається навколо своєї осі і водночас описує кругову траєкторію всередині змішувального бункера. Така комбінація рухів сприяє підйому вмісту бункера знизу вгору, руйнуванню грудок і вирівнюванню щільності кормосуміші. Конусоподібна форма бункера забезпечує рівномірний рух компонентів у всіх напрямках, що підвищує однорідність суміші. Головним недоліком цієї конструкції є складність у виготовленні приводу.

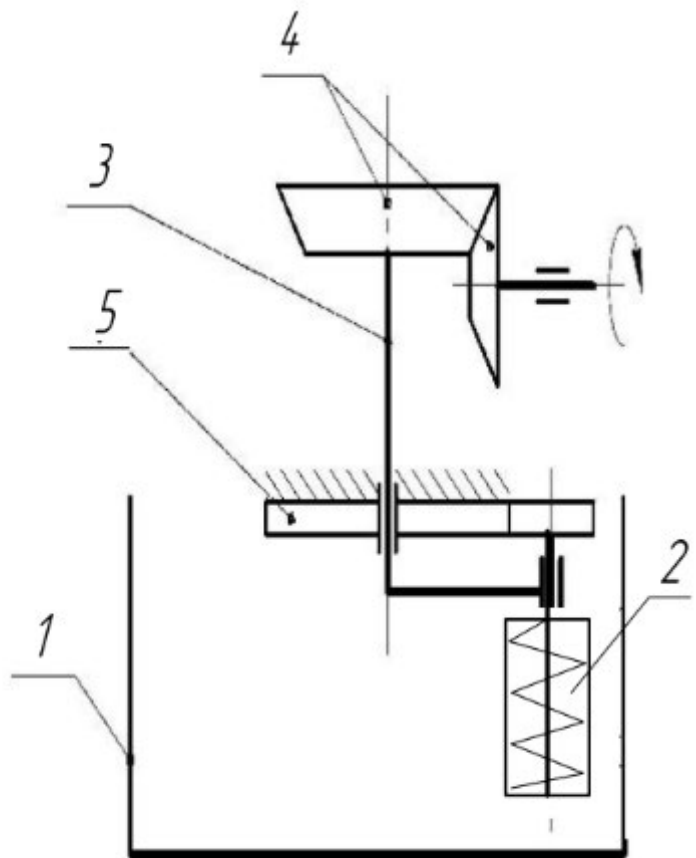


Рисунок 1.2 – Загальний вигляд (а) та кінематична схема (б) планетарно-шнекового змішувача СПШ/20.

Шнекові змішувачі (рисунок 1.3) часто застосовуються для змішування компонентів із близькими фізичними властивостями, якщо до якості готової суміші не висуваються суворі вимоги. Їх конструкція включає корпус із

шнеком, завантажувальну та вивантажувальну горловини, а також привід з електродвигуном і редуктором. Основною перевагою таких змішувачів є простота в експлуатації та виготовленні. Водночас якість суміші може бути недостатньою через те, що змішування відбувається переважно під час транспортування корму. Для покращення змішування можна збільшити довжину шнека або змінити його конструкцію, наприклад, використовуючи перфоровану чи сегментну навивку, або розташувати кілька шнеків у різних напрямках.

Шнекові змішувачі також можуть поєднувати функції змішування з процесами запарювання чи подрібнення, що значно розширює їх функціональність. Найкращі результати досягаються при використанні спеціальних пристроїв для активації процесу змішування.

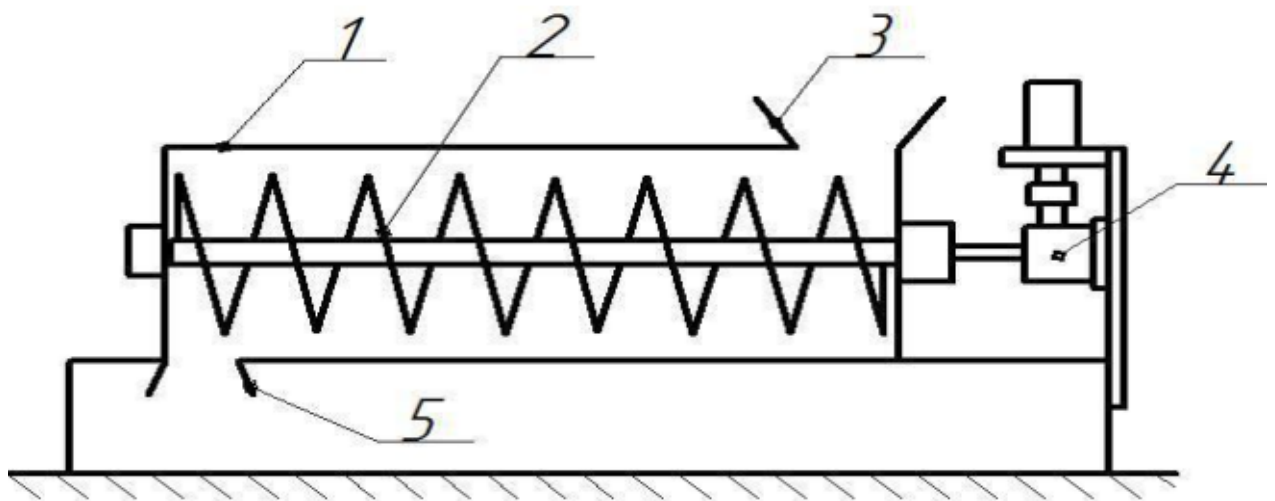


Рисунок 1.3 – Схема одношального шнекового змішувача.

Лопатеві змішувачі, зображені на рисунку 1.4, є ефективнішими порівняно з шнековими завдяки інтенсивнішому перемішуванню. Їх конструкція передбачає бункер, вал із лопатями, електродвигун та редуктор. Важливою перевагою таких змішувачів є можливість налаштування робочих параметрів – наприклад, зміна кута нахилу та форми лопатей, що дозволяє

ефективно змішувати як сипучі, так і рідкі компоненти. Лопатеві змішувачі добре підходять для рівномірного розподілу рідких добавок, таких як жири чи меласа.

Найефективнішими вважаються моделі з двома лопатевими валами, які створюють зустрічні потоки корму, забезпечуючи високу однорідність навіть за складних умов. Для різних завдань випускаються спеціалізовані моделі, зокрема для змішування, запарювання чи збагачення кормів рідкими компонентами.

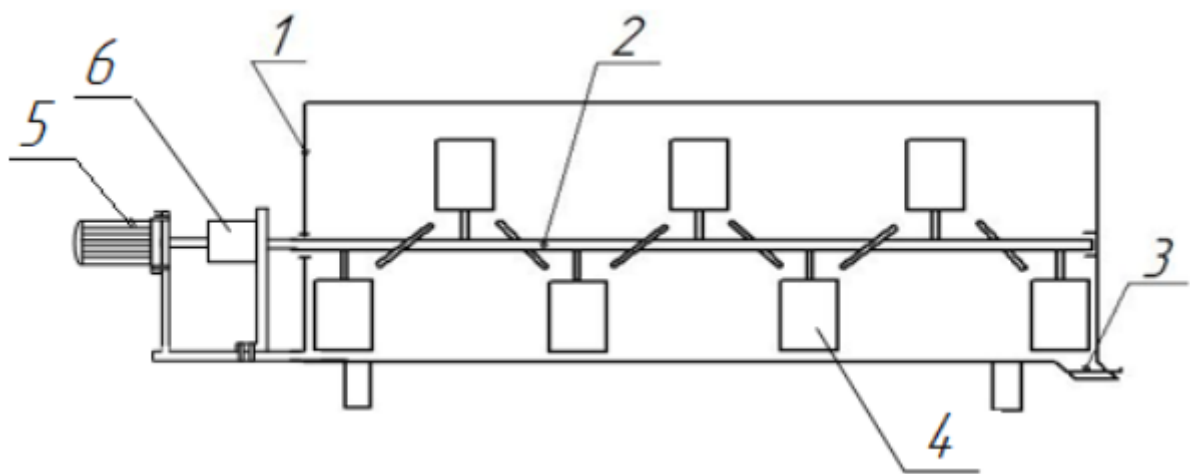


Рисунок 1.4 – Схема лопатевого змішувача.

Рисунок 1.5 представляє класифікацію змішувачів за типом робочих органів та особливостями робочого процесу. Незважаючи на широкий вибір конструкцій, до загальних недоліків існуючих змішувачів належать громіздкість, складність конструкції та горизонтальне розташування робочих органів.

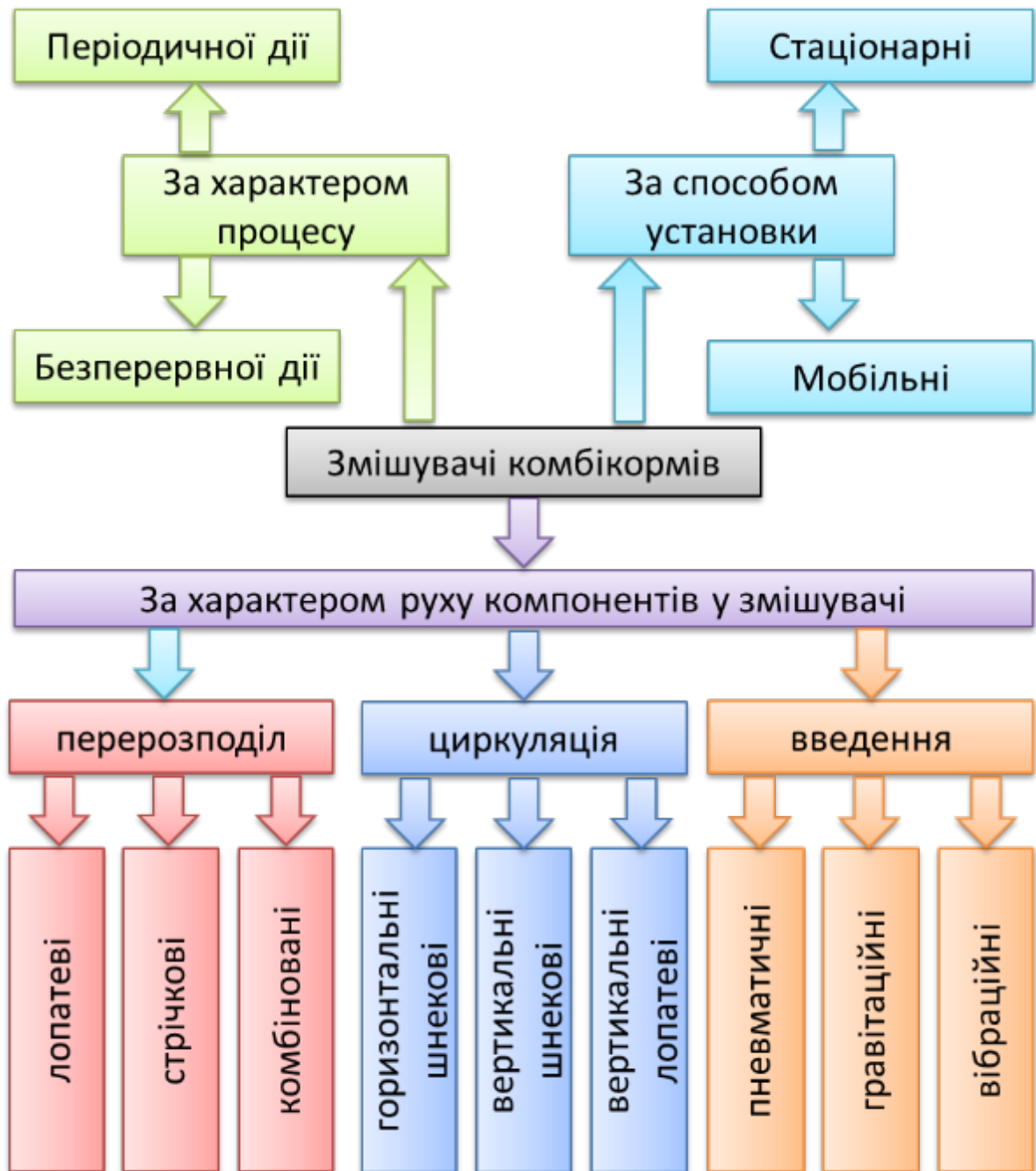


Рисунок 1.5 – Класифікація змішувачів кормів

1.2 Аналіз теоретичних досліджень процесу змішування концентрованих кормів

Процес змішування кількох сипучих компонентів концентрованого корму є складним фізико-механічним явищем, метою якого є досягнення рівномірного розподілу частинок у всьому об'ємі суміші. Частинки можуть

відрізнятися за розміром, масою та станом поверхні, що ускладнює їх перемішування. Під час цього процесу частинки переміщуються під впливом зовнішніх сил як у глибині, так і на поверхні маси, що змішується. При цьому вони можуть падати, підніматися або навіть "літати".

У змішувачах відбувається взаємодія двох основних процесів: взаємного проникнення частинок і їх сегрегації. Ці процеси протилежні за своєю природою, що створює додаткові складнощі під час змішування.

Зважаючи на вищезазначене, підходи до організації процесу змішування значно різняться. Існує безліч теорій, що описують як сам механізм змішування, так і характеристики робочого процесу змішувальних пристроїв. Основними критеріями успішності процесу є кількість отриманої суміші та її якість. Для оцінки якості суміші часто використовують такі показники, як коефіцієнт варіації, який дозволяє визначити однорідність суміші на основі аналізу проб.

З огляду на те, що суміш готується з кількох компонентів, кількість яких може відрізнятися багаторазово, найбільш доцільним є експериментальна оцінка коефіцієнта варіації та порівняння з деяким теоретично можливим ідеалом. Коефіцієнт варіації суміші оцінюється як середньоквадратичне відхилення за такими формулах:

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - p)^2}{n-1}}, \quad (1.1)$$

μ - середнє значення масової частки компонента в досліджуваній пробі;

σ - стандартне відхилення для кожного компонента суміші.

У разі ідеального змішування значення коефіцієнта варіації прагне до мінімуму.

Досить об'єктивну оцінку якості приготовленої суміші може дати також і критерій неоднорідності, в значній мірі схожий з формулою:

$$v = \frac{p \cdot \sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{x_i - p}{n-1}}}{100}, \quad (1.2)$$

У процесі пошуку найкращого режиму змішування необхідно прагнути до мінімізації величини цього критерію; якщо його значення становить менше 20 одиниць, можна зробити висновок, що якість практично будь-якої кормосуміші відповідає зоотехнічним вимогам.

Для практичного використання під час аналізу сумішей часто застосовується формула, яка дозволяє обчислити коефіцієнт варіації в лабораторних умовах. Оцінка якості суміші ґрунтується на визначенні концентрації змішуваних компонентів у вибраних пробах. Цей підхід дозволяє об'єктивно оцінити ступінь рівномірності розподілу компонентів у суміші.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \frac{B_i/B_0}{n}, & B_i < B_0 \\ \sum_{i=1}^n \frac{2-B_i/B_0}{n}, & B_i > B_0 \end{cases} \quad (1.3)$$

де B_i - вміст компонента суміші в досліджуваній i -й пробі змішаного продукту, %.

B_0 - «Еталонна» частка вмісту компонента, %.

i - кількість виконуваних випробувань (відібраних для дослідження проб).

Для забезпечення високого рівня достовірності отриманих даних необхідно відбирати велику кількість проб з різних ділянок приготованої суміші, а також забезпечити багаторазовий повторний відбір проб. Так, Кукта рекомендує відбирати не менше п'яти проб з різних ділянок готової суміші та забезпечувати п'ятикратну повторність кожної проби.

Значення середньоквадратичного відхилення знаходиться за виразом:

$$\sigma = \sum_{i=0}^n \frac{(B_i - \bar{B})^2}{n-1} \quad (1.8)$$

де B_i - вміст контрольного компонента в i -й пробі, %.

В якості контрольного компонента зазвичай беруть компонент з меншою масовою часткою в суміші. Проби беруть з різних ділянок об'єму готової суміші в кількості не менше 5 проб з кожного ділянки. При аналізі сухих сумішей з відносною вологістю не більше 17%, зокрема комбікормів, рекомендована маса проби складає 2-5 г.

Зважаючи на те, що основною властивістю відносної частоти ймовірності є стійкість, для забезпечення достовірності аналізу якості суміші необхідно забезпечити велику повторність взяття проб.

Підсумовуючи основні аналітичні методики визначення якості приготованої суміші кормів, необхідно зазначити, що метою змішування є приготування продукту, що відповідає зоотехнічним вимогам. Для кожного виду тварин передбачені свої вимоги до кормової суміші. Рекомендації в більш загальному вигляді передбачають оцінку якості готової суміші як процентне відношення кількості досліджуваного компонента в пробі корму до «ідеального значення» того ж компонента, вказаного в рецептурі.

Якщо λ перевищує 92%, суміш вважається хорошою, при величині λ менше 85% якість суміші вважається поганою, при величині λ , що знаходиться в діапазоні 85% - 92%, суміш вважається задовільної якості.

Конструкції промислово випускаються смесителі пройшли певний період «технічної еволюції» і мають досить обмежений набір робочих органів. Розрахунок конструктивно-технологічних параметрів відрізняється деякою консервативністю підходу.

Найважливішим параметром будь-якого змішувача, що визначає співвідношення його габаритних розмірів і потужнісних характеристик, є продуктивність або пропускна здатність. Для визначення можливих значень продуктивності змішувача з ленточним шнеком запропонована формула:

$$Q_{max} = \pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot n \cdot S \cdot \rho \cdot \psi, \quad (1.9)$$

де D - зовнішній діаметр навивки шнека, м.

d - діаметр труби, на якій закріплена навивка шнека, м.

n - частота обертання шнека, c^{-1} .

S - крок установки навивки ленточного типу на шнеку, м.

ρ - усереднена величина об'ємної маси змішуваних компонентів, $кг/м^3$.

ψ - коефіцієнт, що враховує ступінь заповнення вільного простору шнека продуктом.

Однією з найважливіших характеристик будь-якого змішувача, що дозволяє визначити його основні конструктивні характеристики, є споживана потужність. Оскільки для шнекового конвеєра відомо кілька методик визначення потужності, наводимо найбільш поширені.

Так, А.М. Григор'єв пропонує визначати потужність як роботу, що виконується при підйомі корму за одиницю часу на потрібну висоту:

$$N = \frac{Q(L_2 \cdot W + H)}{367}, \quad (1.10)$$

де:

Q - продуктивність транспортуючого пристрою, $кг/с$,

L_2 - проекція траєкторії руху кормосуміші на горизонтальну площину, м,

W - коефіцієнт, що враховує опір переміщеному корму, створюваний через тертя об внутрішні стінки конвеєра,

H - висота транспортування корму, м.

Аналогічна залежність, але в дещо спрощеному вигляді, отримується при розгляді шнека як конвеєра, що створює певний опір проходженню корму всередині циліндричної камери:

$$N_{ш} = 0,01 \cdot k \cdot Q \cdot H, \quad (1.11)$$

де:

k - обчислюваний коефіцієнт, що показує величину опору, що створюється кормом при транспортуванні через шнек,

Q - продуктивність транспортуючого пристрою, кг/с,

H - висота транспортування суміші, м.

Відомо, що транспортувана суміш може мати різні показники вологості, але й величина тертя, що створюється кормом при терті об стінки корпусу і робочі органи, може суттєво відрізнятися. При високій швидкості руху порції корму можуть виникати умови, близькі до гідравлічного тертя в діапазоні широко поширених пристроїв.

Потужність шнекового конвеєра можна визначити за формулою:

$$N = \frac{(N_1 + N_2 + N_3)k}{\eta}, \quad (1.12)$$

де:

N_1 - затрати потужності, що виникають при терті корму об поверхню навивки шнека, Вт,

N_2 - затрати енергії, необхідні для подолання тертя корму об оболонку шнека, Вт,

N_3 - потужність, необхідна для транспортування корму по транспортеру (в чистому вигляді), Вт,

k - коефіцієнт, що сумує втрати енергії, що виникають в результаті часткового перемішування корму і часткового його подрібнення при транспортуванні всередині циліндра шнека,

η - сумарне значення ККД елементів системи приводу транспортера, %.

1.3 Мета роботи і задачі досліджень

Мета досліджень. Обґрунтування параметрів змішувача концентрованих кормів.

Для досягнення поставленої мети визначені такі завдання дослідження:

1. Провести аналіз змішувачів концентрованих кормів.
2. Теоретично та експериментально обґрунтувати параметри змішувача концентрованих кормів, обладнаного механічним активатором.
3. Розробити змішувач концентрованих кормів, обладнаний механічним активатором.
4. Випробувати змішувач концентрованих кормів у виробничих умовах та оцінити його техніко-економічний ефект.

1.4 Висновки

Проведений огляд літературних джерел дозволяє зробити такі висновки:

Годівлю основних сільськогосподарських тварин доцільніше здійснювати сухими сипучими кормами, оскільки це дозволяє скоротити витрати на приготування корму, забезпечує тривале зберігання кормів, дає можливість оперативно змінювати склад раціону та використовувати різні кормові добавки.

Розвиток конструкцій змішувачів спрямований на підвищення технічної надійності існуючих пристроїв при одночасному зниженні вартості виробництва концентрованого корму. Крім того, важливим завданням є створення змішувачів з розширеними функціональними можливостями, що забезпечують високі технологічні та ергономічні характеристики.

Перспективним рішенням у цій сфері є розробка пристроїв, які поєднують у своїй конструкції гравітаційні механізми змішування із активаторами механічного шнека. Така комбінація дозволяє зменшити енерговитрати технологічного процесу та зберегти компактні розміри обладнання.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІШУВАЧА КОМБІКОРМІВ

2.1 Схема змішувача концентрованих кормів

Змішувач для концентрованих кормів включає бункер (1), обладнаний завантажувальним приймачем (2) та розвантажувальною горловиною (3). Всередині встановлено вертикальний шнек (4), оточений кожухом (5), у якому розташовані перепускні вікна (6) і (7) із регульованими заслінками (8) та (9). Одне з перепускних вікон (7) із заслінкою (9) розташоване посередині кожуха. У зоні між вікнами (6) і (7) в бункері знаходиться активатор (10), який включає вал (11) із двома пластинами-відбивачами (12), що розміщені під кутом α одна до одної симетрично відносно осі обертання вала. Активатор приводиться в рух електродвигуном (13), а для роботи шнека використовується окремий електродвигун (15).

Принцип роботи змішувача: компоненти кормової суміші пошарово завантажуються через приймач (2) у бункер (1), при цьому заслінка (14) на горловині (3) закрита. Після запуску електродвигуна (15) шнек (4) починає переміщувати інгредієнти вздовж кожуха (5) угору. Коли заслінка (9) на вікні (7) відкрита, частина суміші повертається в бункер, забезпечуючи додаткове перемішування.

Основна маса компонентів через вікно (6) із відкритою заслінкою (8) потрапляє на пластини активатора (10). Під дією електродвигуна (13) активатор створює коливальні рухи, завдяки яким пластини рівномірно розподіляють суміш по об'єму бункера (1). Це покращує якість перемішування. Після кількох циклів циркуляції (зазвичай 2-3) суміш досягає необхідної однорідності, після чого її вивантажують через горловину (3), відкривши заслінку (14).

Синхронна робота шнека та механічного активатора змішувача забезпечує високу однорідність приготовленої кормової суміші, що

виражається у високих значеннях коефіцієнта варіації. Завдяки такій конструкції досягається рівномірний розподіл порошкоподібних добавок, зокрема преміксів, по всьому об'єму суміші. У процесі роботи змішувача сипучі компоненти перебувають у русі, який включає різні фази: польоту, ковзання по поверхнях, а також конвекційні потоки всередині бункера.

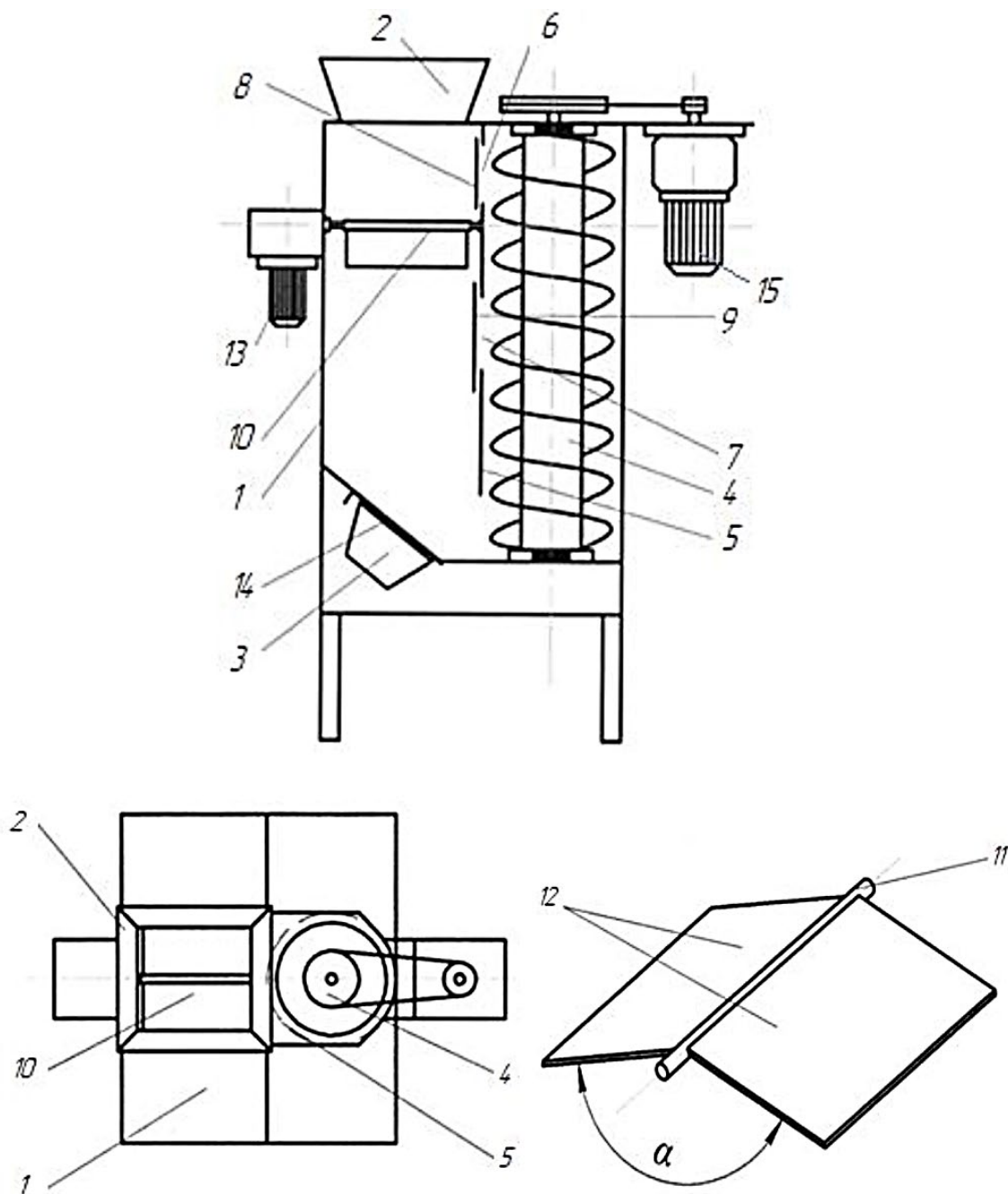


Рисунок 2.1 – Схема змішувача концентрованих кормів

Зважаючи на складність процесу, для розробки моделі змішування необхідно застосувати відповідний математичний апарат, що здатний описати спостережувані явища. Найбільш доцільним є використання методів гідродинаміки, термодинаміки та статистичної фізики. Це можна обґрунтувати наступними припущеннями:

- у фазі польоту дрібнодисперсні частинки поведуться подібно до рідини;
- наявність вільного простору у бункері сприяє спрямованому руху суміші, що можна інтерпретувати як конвекційний процес;
- процеси змішування розглядаються у часових інтервалах, достатніх для того, щоб вважати рух частинок ustalеним і систематичним.

2.2 Математична модель процесу змішування

Дослідимо різні кінематичні режими руху механічного активатора, за яких буде досягнута прийнятна ступінь змішування.

Умовно припустимо, що бункер є двовимірною областю прямокутної форми: вертикальним перерізом ємності, в якій відбувається змішування (рисунок 2.2).

Запишемо тепер усі рівняння. Використовуватимемо звичні позначення та систему координат, як показано на рисунку 2.2 б.

Припускаючи, що область симетрична відносно своєї середини, обмежимося розглядом лише лівої половини області.

Вертикальний відрізок AG – висота змішувача, відрізок EF – область завантаження суміші, відрізок AB – область розвантаження суміші. Рівняння ustalеного руху суміші концентрованих кормів буде виглядати так:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{FE} = -v_0, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{AD} = v_0, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{BC+CD+ED+FG+GA} = 0 \end{array} \right. \quad (2.1)$$

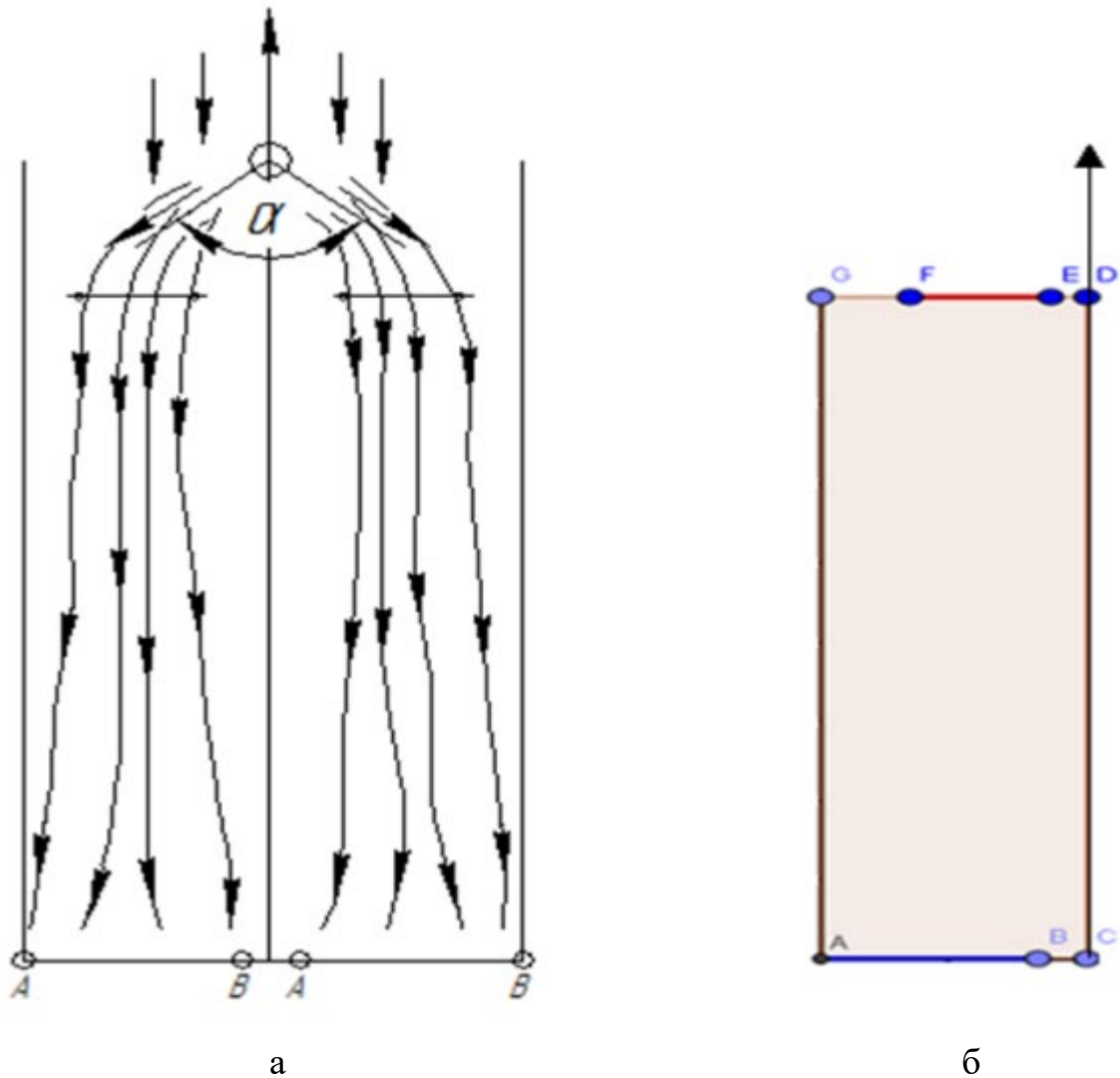


Рисунок 2.2 – Схема розподілу компонентів активатором (а) та розрахункова область процесу змішування (б)

Це перше рівняння, яке ми будемо розв'язувати. Його основна мета – отримати наближене значення поля швидкостей для пошуку складнішого рішення – рівняння руху змішаної маси, що має в'язкі властивості. Часом встановлення стаціонарного поля швидкостей нехтуємо порівняно із загальною тривалістю процесу змішування.

Рівняння (стаціонарного виду) руху в'язкої суміші та граничні умови для виділення єдиного рішення набувають такого вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho u \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \\ \rho v \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \rho g, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{AC} = \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{DG} = 0, u|_{CD+AG} = 0, \\ \frac{\partial v}{\partial n} \Big|_{CD} = \frac{\partial v}{\partial n} \Big|_{AG} = 0, v|_{BC+DE+FG} = 0, \\ v|_{AB} = v_0, v|_{EF} = -v_0 \end{array} \right. \quad (2.2)$$

Це значно складніша система з двох рівнянь. Тому як початкове наближення обираємо рішення попереднього рівняння.

Рівняння (несталі) дифузії Фоккера-Планка та граничні умови для виділення єдиного рішення набувають вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial f}{\partial t} = b_{11} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + b_{22} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial f}{\partial y} \right), \\ f|_{t=0} = f_0 \\ f|_{AB+BC+CD+DE+EG+GF+FA} = 0 \end{array} \right. \quad (2.3)$$

Блок-схема розв'язання задачі оптимізації показана на рисунку 2.3.

Кожну з перелічених крайових задач будемо розв'язувати в такій послідовності:

- вводимо в області та на границі сітку;
- апроксимуємо в області та на границі диференціальні оператори їхніми сітковими аналогами, у результаті чого отримуємо систему лінійних рівнянь, яку розв'язуємо;
- отримане рішення сіткового рівняння приймаємо як шукане рішення відповідної крайової задачі.

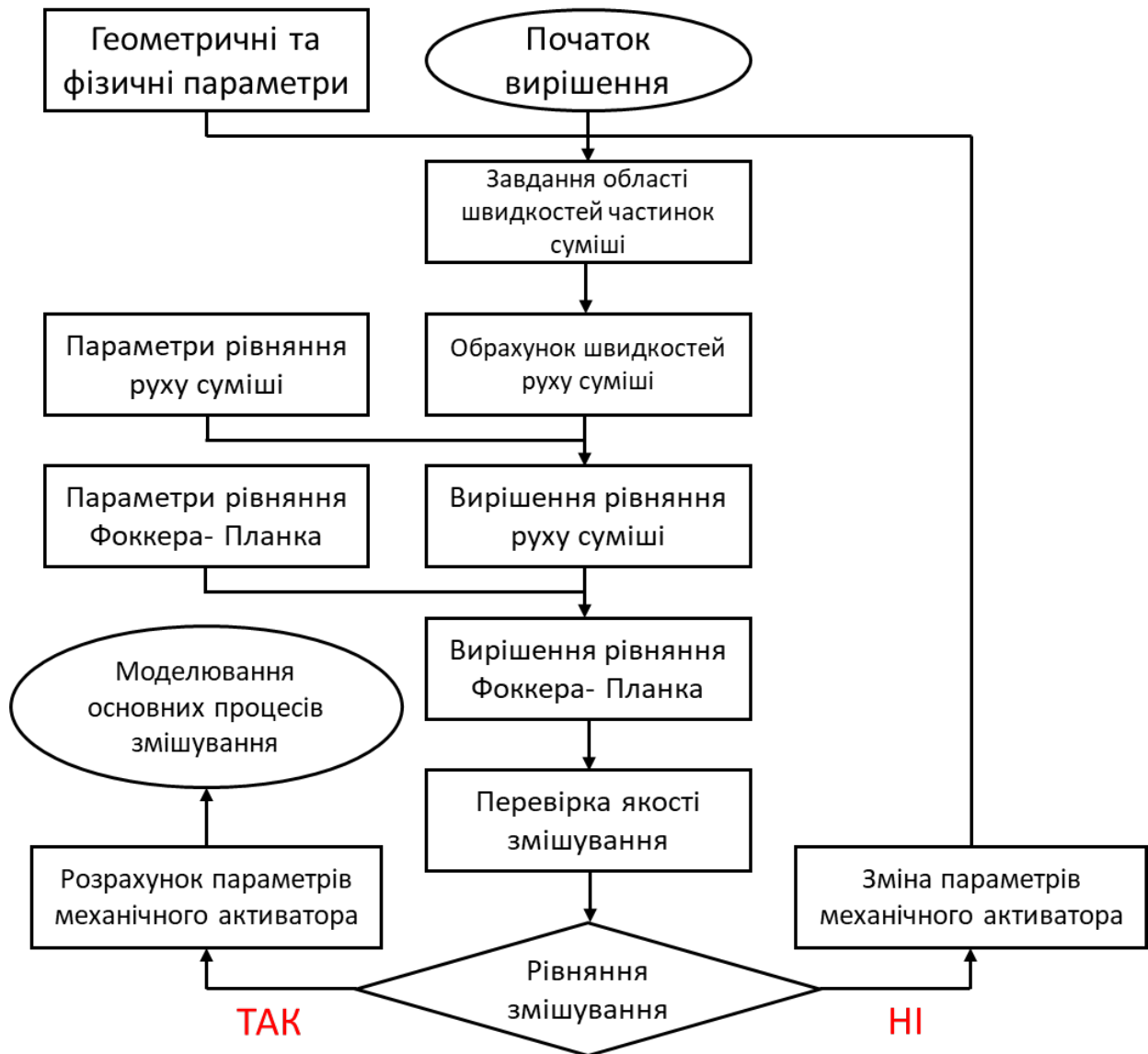


Рисунок 2.3 – Блок-схема задачі оптимізації

2.3 Розв’язання встановленого диференціального рівняння руху

Прийемо такі позначення. Нехай l_x – геометричний розмір області у напрямку горизонтальної осі, а l_y – у напрямку вертикальної осі. Задамо довільне число N .

$$(x_i, y_j) = \left(\frac{l_x}{N} \cdot i, \frac{l_y}{N} \cdot j \right), i, j = 0, 1, \dots, N$$

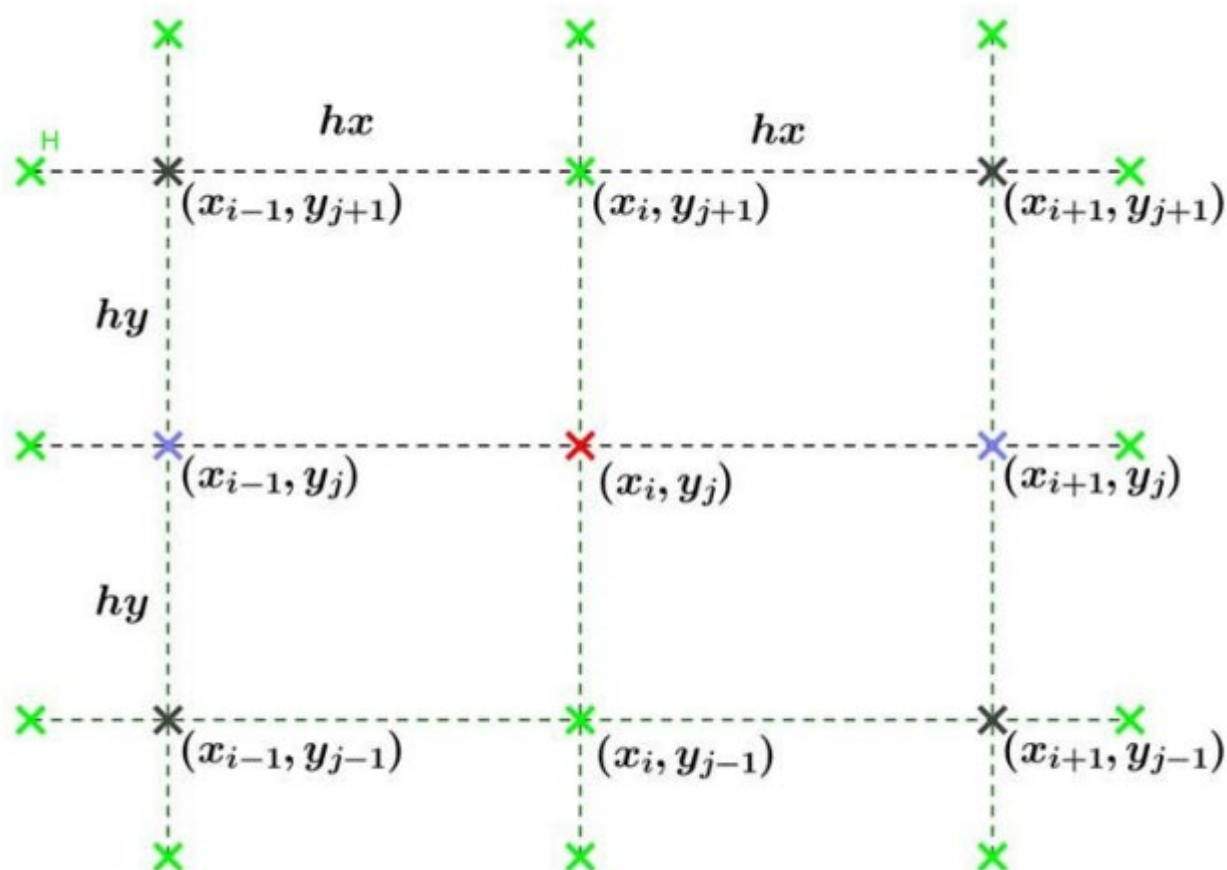


Рисунок 2.4 – Сітковий шаблон

Ці точки називаються вузлами сітки. Якщо в області задано деяку функцію $u(x, y)$, то позначимо $u_{ij} = u(x_i, y_j)$ – значення цієї функції у вузлі сітки.

Апроксимація першої похідної

Розглянемо побудову різницевої похідної в деякому вузлі. Для цього скористаємося визначенням самої похідної, наприклад, часткової за напрямком осі Ox :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{u(x + \Delta x, y) - u(x, y)}{\Delta x} \quad (2.4)$$

Якщо в цьому визначенні покласти $x = x_i, x + \Delta x = x_{i+1}, y = y_j$, то отримаємо наближене рівняння

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{ij} = u'_{xij} \approx \frac{u_{i+1j} - u_{ij}}{hx} \quad (2.5)$$

яке тим точніше, чим менший обирається крок сітки. Аналогічно, для похідної за віссю Oy отримаємо вираз:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{ij} = u'_{yij} \approx \frac{u_{ij+1} - u_{ij}}{hy} \quad (2.6)$$

Нормальні похідні, значення яких визначаються на межах області, виражаються через різницеві похідні у напрямках осей Ox і Oy, оскільки межі області є координатними лініями.

Апроксимація другої похідної

. Припускаючи, що функція має необхідну кількість похідних у кожному вузлі, скористаємося формулою Тейлора:

$$\begin{aligned} u_{i+1j} &= u_{ij} + u'_{xij}hx + \frac{1}{2}u''_{xxij}hx^2 + o(hx^2) \\ u_{i-1j} &= u_{ij} - u'_{xij}hx + \frac{1}{2}u''_{xxij}hx^2 + o(hx^2) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Ці два рівняння можна додати та виразити другу похідну:

$$\left. \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right|_{ij} = u''_{xxij} \approx \frac{u_{i+1j} - 2u_{ij} + u_{i-1j}}{hx^2}, \quad (2.8)$$

Аналогічно для другої похідної за змінною y отримаємо:

$$\left. \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right|_{ij} = u''_{yyij} \approx \frac{u_{ij+1} - 2u_{ij} + u_{ij-1}}{hy^2}, \quad (2.9)$$

Це означає, що слід розглядати диференціальні рівняння не в довільній точці області, а лише у вузлах сітки. Більше того, у кожному вузлі слід застосувати

апроксимацію похідних. У результаті отримаємо різницеву систему лінійних рівнянь стаціонарного руху сипучої маси, яка має фізичні властивості, схожі з ідеальною рідиною:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\varphi_{i+1j}}{hx^2} + \frac{\varphi_{i-1j}}{hx^2} + \frac{\varphi_{ij+1}}{hy^2} + \frac{\varphi_{ij-1}}{hy^2} - \left(\frac{\lambda \varphi_{ij}}{hx^2} + \frac{\lambda \varphi_{ij}}{hy^2} \right) = 0, \\ \quad i, j = 1, \dots, N-1 \\ \frac{\varphi_{iN} - \varphi_{iN-1}}{hy} \Big|_{(i,j) \in FE} = -v_0, \\ \frac{\varphi_{i1} - \varphi_{i0}}{hy} \Big|_{(i,j) \in AB} = -v_0, \\ \frac{\varphi_{i1} - \varphi_{i0}}{hy} \Big|_{(i,j) \in BC} = 0, \quad \frac{\varphi_{iN} - \varphi_{iN-1}}{hy} \Big|_{(i,j) \in DE \cup FC} = 0, \\ \frac{\varphi_{1j} - \varphi_{0j}}{hx} \Big|_{(i,j) \in GA} = 0, \quad \frac{\varphi_{Nj} - \varphi_{N-1j}}{hx} \Big|_{(i,j) \in GD} = 0, \end{array} \right. \quad (2.10)$$

Отримана система лінійних алгебраїчних рівнянь має єдине розв'язання, яке може бути отримане різними методами. Знаючи потенціал руху суміші концентрованих кормів, що має властивості ідеальної рідини, швидкість визначається виразом $v = -grad \varphi$ або його сітковим аналогом, який слід використовувати як початкове наближення під час розв'язання рівнянь руху компонентів суміші:

$$u_{ij} = \frac{\varphi_{i+1j} - \varphi_{ij}}{hx}, \quad v_{ij} = \frac{\varphi_{ij+1} - \varphi_{ij}}{hy} \quad (2.11)$$

Сіткові рівняння вже є нелінійними. Для пошуку їх розв'язання слід застосувати ітераційний метод, наприклад, метод Зейделя або метод покоординатного спуску.

Розв'язання сіткового рівняння Фоккера-Планка

Випишемо сіткові рівняння Фоккера-Планка. Початкове рівняння має параболічний тип і додатково залежить від часу. Тому спочатку побудуємо дискретний аналог за просторовими змінними. Отримуємо наступну систему звичайних диференціальних рівнянь щодо невідомої густини:

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial t} = (b_{11} - u_{ij}) \frac{f_{i+1j} - 2f_{ij} + f_{i-1j}}{hx^2} + (b_{22} - v_{ij}) \frac{f_{i1j} - 2f_{ij} + f_{i-1j}}{hy^2} \\ - \frac{u_{i-1j} - u_{ij}}{hx} \cdot \frac{f_{i+1j} - f_{ij}}{hx} - \frac{v_{i1j} - v_{ij}}{hy} \cdot \frac{f_{i-1j} - f_{ij}}{hy} \\ f_{ij}|_{t=0} = f_0 \\ f_{ij}|_{ij \in AB \cup BC \cup CD \cup DE \cup EG \cup GF \cup FA} = 0 \end{cases} \quad (2.12)$$

Отримана система звичайних лінійних диференціальних рівнянь за заданих початкових умов має єдине розв'язання, яке можна знайти за допомогою числових методів у системі MathCAD. Розв'язання залежить від часової змінної. Завчасно відомо, що при досить великому інтервалі часу розв'язання прямує до сталої величини для довільного вузла сітки:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f_{ij}(t) = \frac{f_0}{N^2} \quad (2.13)$$

З практичної точки зору, задачу змішування необхідно вирішити за скінченний час. Таким вважатимемо час, за який частинка здійснить два оберти в області. Саме таким чином і відбуваються перенос фази та її дифузійне розмивання.

Тепер необхідно ввести певну характеристику якості змішування. Зупинимося на одній із них – коефіцієнті варіації, тобто відношенні стандартного відхилення (квадратного кореня із дисперсії) до середнього значення (математичного очікування):

$$v = \frac{\sqrt{D[f]}}{M[f]} \quad (2.14)$$

У нашому випадку можна знайти лише вибірковий коефіцієнт варіації концентрації фази Б. Для цього обчислимо вибірковий початковий момент першого порядку – вибіркове середнє, тобто середню концентрацію:

$$A_1 = \frac{1}{(N-1)^2} \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} f_{ij} h y h x \quad (2.15)$$

Далі обчислимо вибірковий початковий момент другого порядку:

$$A_2 = \frac{1}{(N-1)^2} \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} f_{ij}^2 h y h x \quad (2.16)$$

На основі останньої величини обчислюємо квадрат вибіркового середнього та отримуємо вибіркову дисперсію:

$$M_2 = A_2 - A_1^2 \quad (2.17)$$

І, нарешті, визначаємо вибірковий коефіцієнт варіації:

$$\bar{v} = \frac{\sqrt{M_2}}{A_1} \quad (2.18)$$

У найгіршому випадку змішування коефіцієнт варіації близький до величини об'єму області. А для рівномірного розподілу фази Б він близький до нуля. Тому, чим менший коефіцієнт варіації, тим вдаліше обрано режим змішування.

Наведемо два варіанти розташування плям закиду, щоб сформулювати остаточні висновки щодо моделювання полів швидкостей і концентрацій.

Розглянемо розташування плями закиду. Її межі: ліва – 0,05 м, права – 0,15 м. Протяжність плями становить 0,1 м. Результат моделювання зображено на рисунку 2.5.

Колір на рисунку відповідає значенню потенціалу. Червоний колір – найбільше значення, фіолетовий – найменше. Цього ж принципу будемо дотримуватися й при розгляді інших рисунків. Лінії на рисунку – екіпотенціальні. Вони перпендикулярні до меж області. Швидкість руху завжди перпендикулярна до цих ліній, а величина швидкості обернено пропорційна відстані між ними.

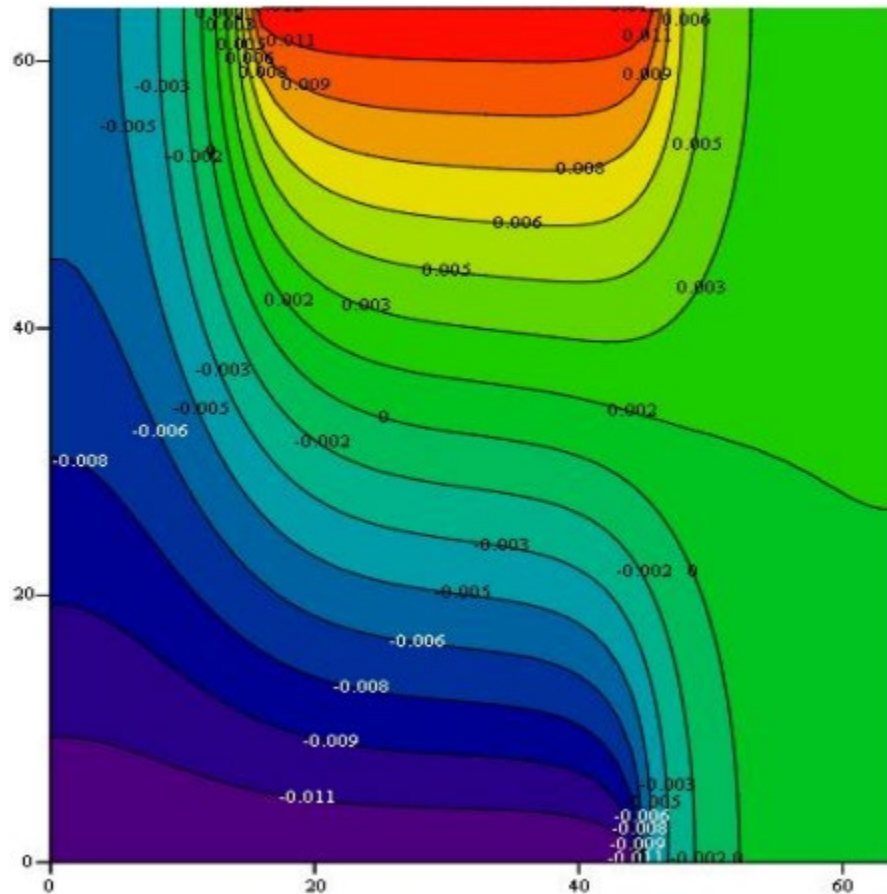


Рисунок 2.5 – Потенціал (варіант 1)

Пояснення до отриманого рисунка

Поле потенціалу таке, що екіпотенціальні лінії майже горизонтальні або спрямовані вліво. Це означає, що конвекційні потоки переносу спрямовані вниз і до центру. Лише невелика їх частина розносить концентрацію фази Б у праву частину.

Мінімальне значення горизонтальної швидкості становить -0.384 м/с, максимальне - 0.18 м/с, середнє - -0.072 м/с. Це означає, що основний напрямок горизонтального переміщення є справа наліво (рисунок 2.6).

Відповідно, для вертикальної швидкості ці величини дорівнюють -0.268 м/с, 0.164 м/с і -0.12 м/с. Зазначимо, що швидкість вертикального переміщення зросла (рисунок 2.7). Середній час одного оберту суміші склав 72 с.

Середнє значення модуля швидкості зросло приблизно в 10 разів і досягло величини 0.079 м/с (рисунок 2.8). Значення вибіркового коефіцієнта варіації зменшилося до $va = 0.819$ (рисунок 2.9).

Звернімо увагу на те, що область, зафарбована фіолетовим кольором, зменшилася. Пляма значно збільшилася. Вона займає практично всю верхню поверхню області. Суміш (фаза Б) подається не в окрему точку, а одразу у всі верхні точки (рисунок 2.10).

Поле потенціалу таке, що основний напрямок швидкостей конвекції спрямований вліво і вниз, тобто у бік зони вивантаження. Проте частина конвекційних потоків спрямована у верхній правий кут, що сприяє більш рівномірному розподілу фази Б.

Зазначимо, що при цьому конвекційні швидкості зменшилися.

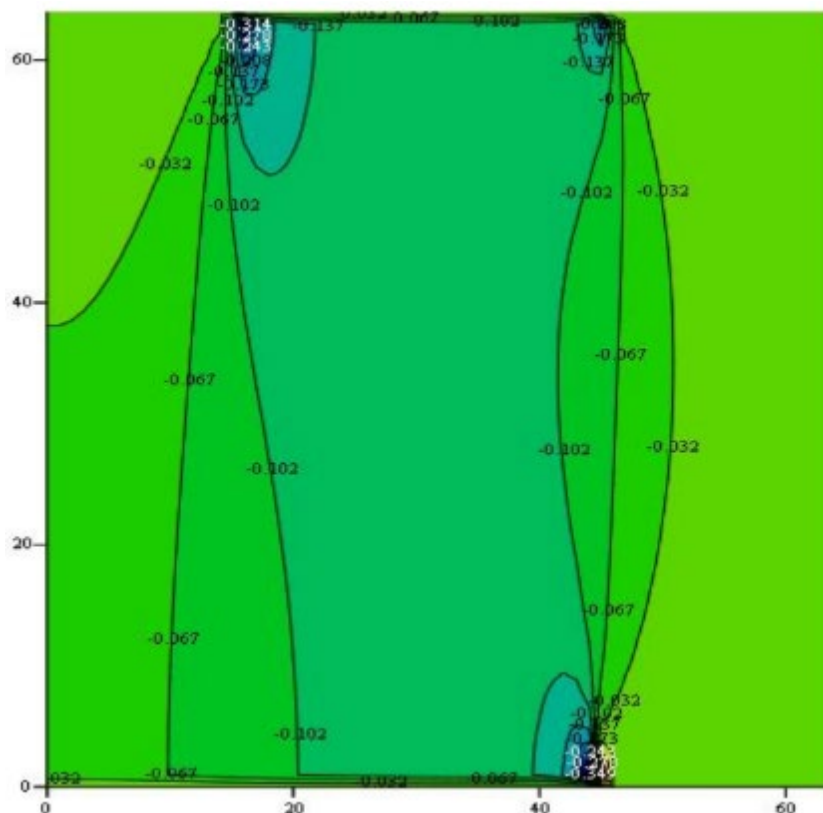


Рисунок 2.6 – Горизонтальна складова швидкості (варіант 1)

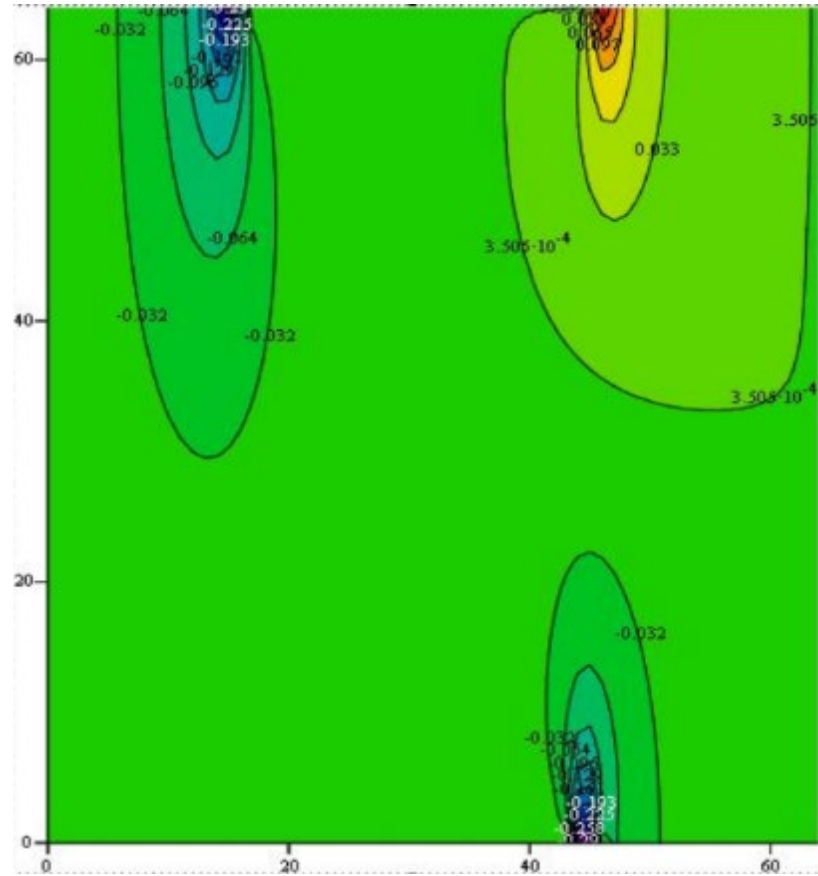


Рисунок 2.7 – Вертикальна складова швидкості (варіант 1)

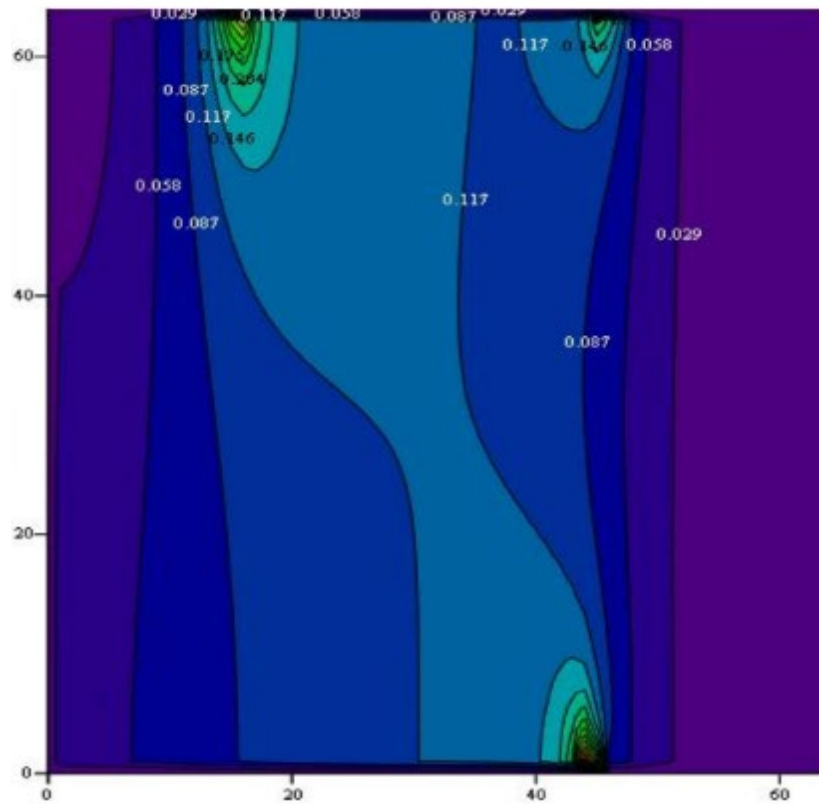


Рисунок 2.8 – Модуль швидкості (варіант 1)

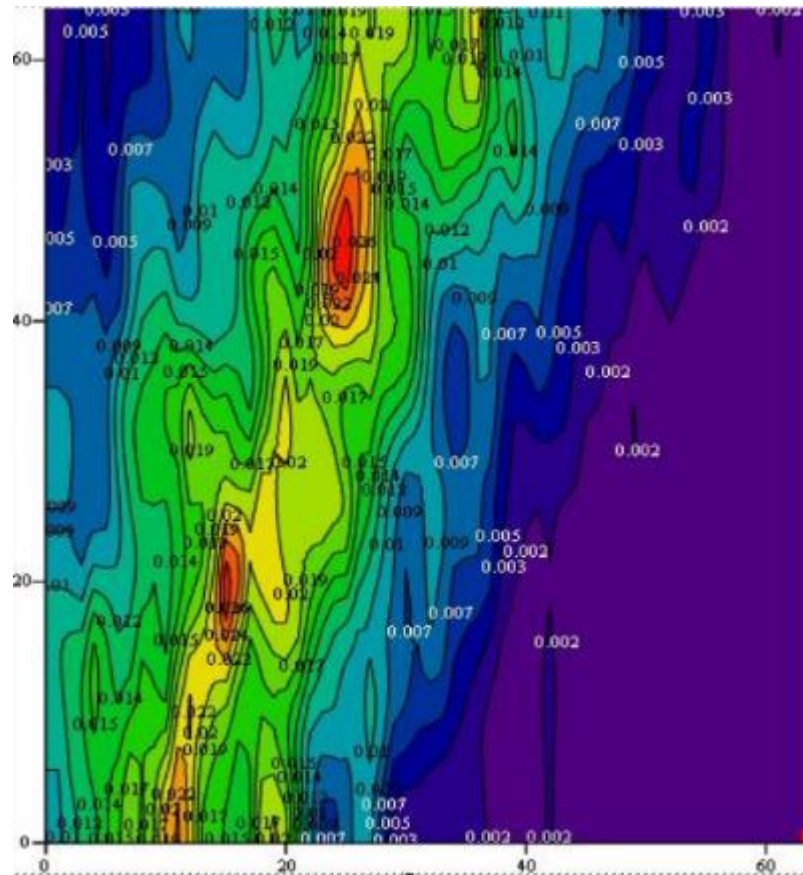


Рисунок 2.9 – Розподіл концентрації (варіант 1)

Мінімальна горизонтальна швидкість становить -0.141 м/с, максимальна - 0.07 м/с, середня - -0.026 м/с (рисунок 2.11). Для вертикальної швидкості ці величини дорівнюють -0.101 м/с, 0.016 м/с і -0.004 м/с (рисунок 2.12).

Для модуля швидкості отримано: 0.0004 м/с, 0.172 м/с і 0.0027 м/с. Незважаючи на те, що якість приготування суміші покращилося ($va = 0.466$), час одного оберту зріс до 210 с (рисунок 2.13).

Область, зафарбована фіолетовим кольором, суттєво зменшилася. Концентрація фази Б стала значно більш рівномірною порівняно з першим варіантом.

У результаті проведеного обчислювального експерименту для заданого часового інтервалу змішування можна зробити такі висновки:

існує принципова можливість керування якістю змішування шляхом вибору положення та розмірів плями подачі суміші;

чим менші розміри плями подачі, тим вищий коефіцієнт варіації та гірша якість змішування;

чим ближче пляма подачі суміші до центру або до краю області, тим більший коефіцієнт варіації;

розрахунок поля швидкостей без урахування в'язкості (рівняння руху ідеальної рідини) не призводить до значного відхилення від поля швидкостей, що обчислюється за допомогою рівнянь в'язкої рідини. Розбіжності не перевищують відносної величини в 10–15 %.

На основі сформульованих висновків подальші дії будуть такими. Для різних значень параметрів плями подачі визначатимемо значення вибіркового коефіцієнта варіації. Тобто будемо неодноразово вирішувати задачі руху рівняння ідеальної рідини та рівняння Фоккера-Планка.

Для наочності основні значення математичного моделювання подано на рисунку 2.14. Результати двох розглянутих варіантів також включено в таблицю (виділено). Простежується закономірність, сформульована у висновках.

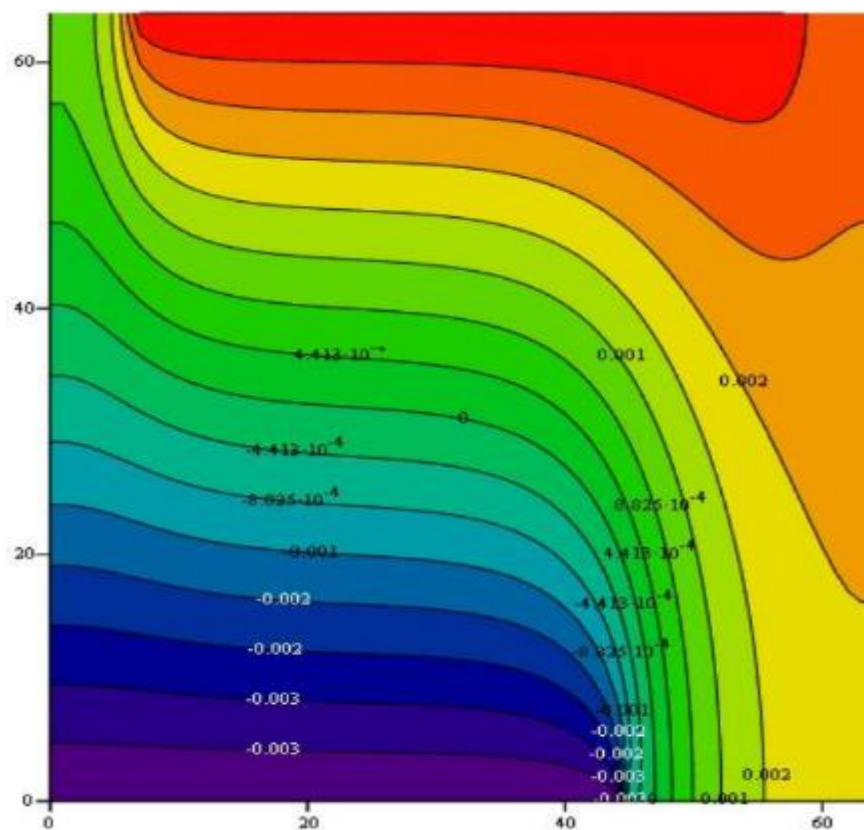


Рисунок 2.10 – Потенціал (варіант 2)

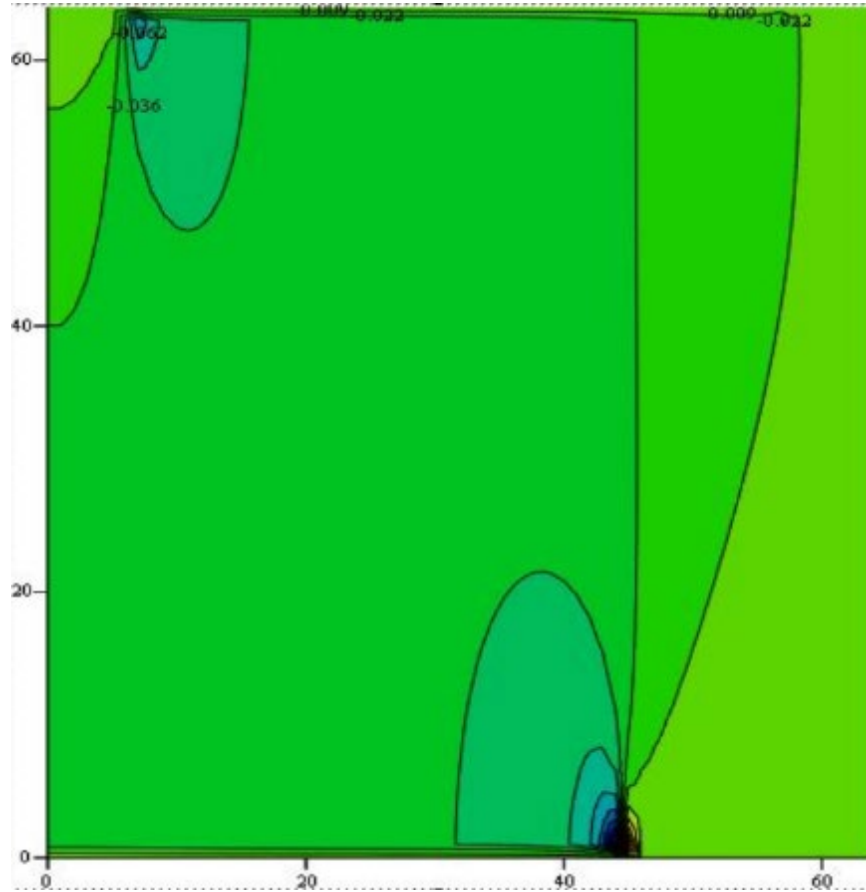


Рисунок 2.11 – Горизонтальна складова швидкості (варіант 2)

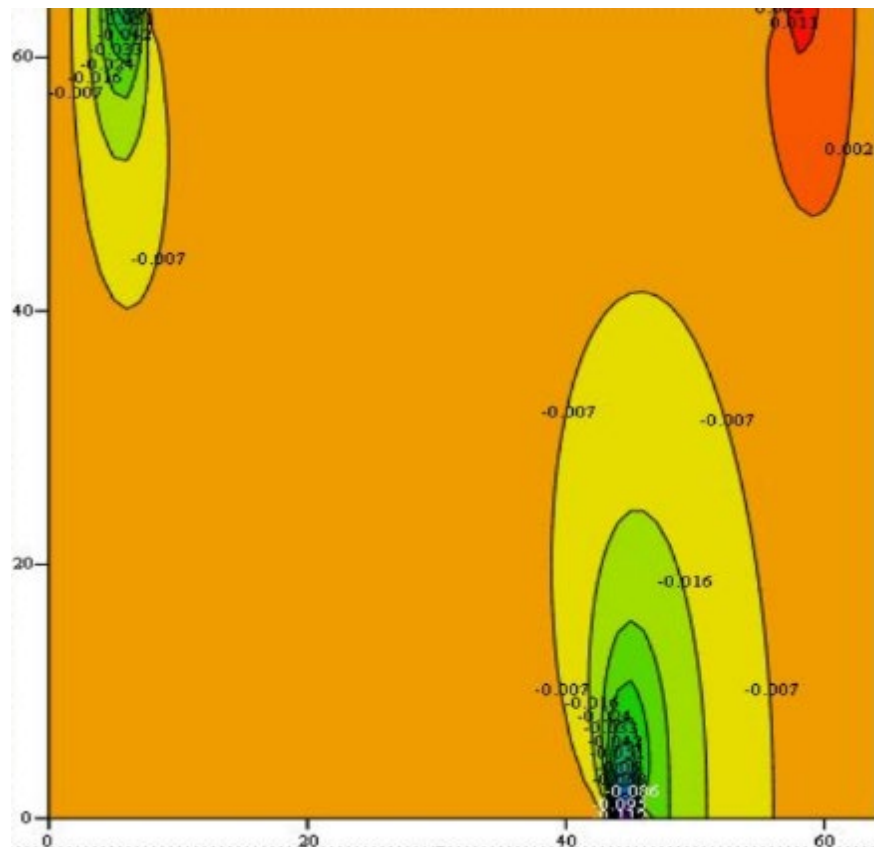


Рисунок 2.12 – Вертикальна складова швидкості (варіант 2)

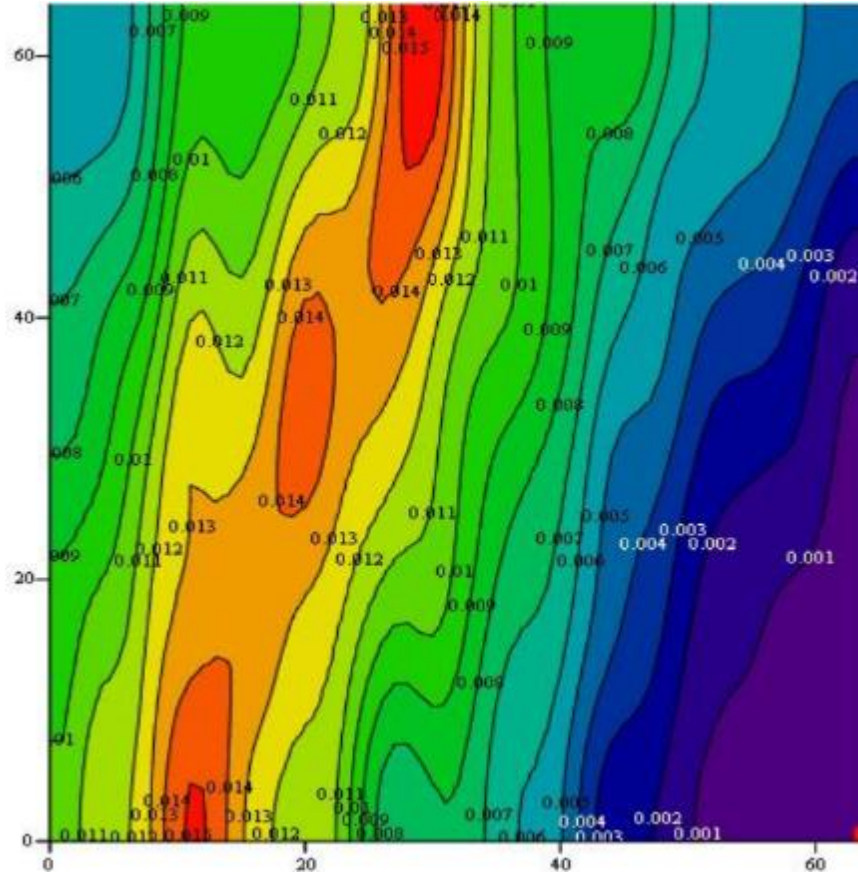


Рисунок 2.13 – Розподіл концентрації (варіант 1)

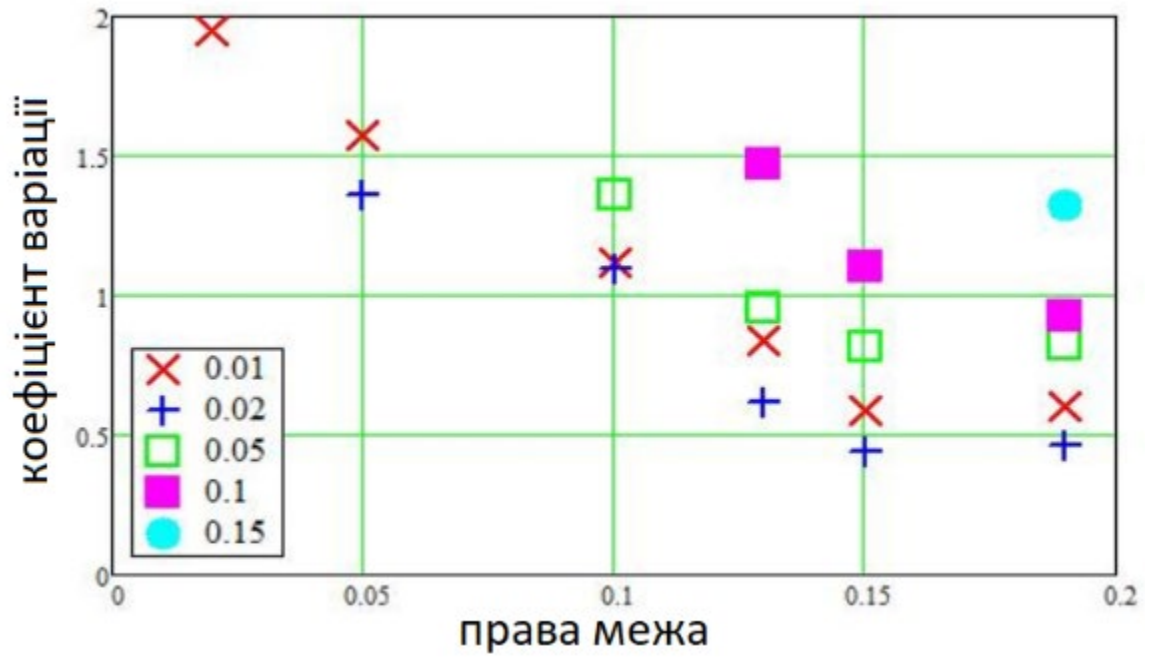


Рисунок 2.14 – Значення коефіцієнту варіації

Ймовірно, найбільш вдале розташування плями подачі: ліва межа плями - 0,02 м, права межа - 0,15 м. Тут можливий певний компроміс. Не можна занадто наближатися до центру, оскільки в цьому випадку частинки фази Б будуть прискорено просуватися зверху вниз, не зазнаючи достатньої кількості зіткнень, щоб випадковим чином дифундувати в області з меншою концентрацією. Аналогічно, занадто близьке розташування плями до зовнішньої межі призводить до того, що велика кількість частинок потрапляє в область, де через відсутність конвекції вони затримуються надовго.

2.3 Рівняння руху потоку частинок по лопатям механічного активатора

У попередніх розділах визначені причини, що призводять до різних значень коефіцієнта варіації. Нам відомі параметри плями подачі, за яких досягається прийнятний рівень коефіцієнта варіації. Тепер спробуємо зрозуміти, як має рухатися механічний активатор, щоб падаючий потік частинок накривав пляму подачі суміші.

Нехай a та b - відповідно права і ліва координати плями подачі суміші механічним активатором. Розглянемо нахилену площину, по якій рухається потік частинок. Припускаючи, що швидкості частинок однакові, можна розглянути рух лише однієї частинки.

Скористаємося квазістатичним наближенням, тобто знехтуємо силами інерції, які виникають під час руху по рухомій поверхні. Це означає, що кут нахилу φ площини, який залежить від часу t , будемо вважати сталим (площина «заморожена») і розглядати величину t як певний змінний параметр.

Оскільки частинка рухається по нахиленій площині без відриву від неї, то рівнодійна сила, перпендикулярна до цієї площини, дорівнює нулю, а рівнодійна вздовж площини є сумою сили ковзання та сили тертя (рисунок 2.15).

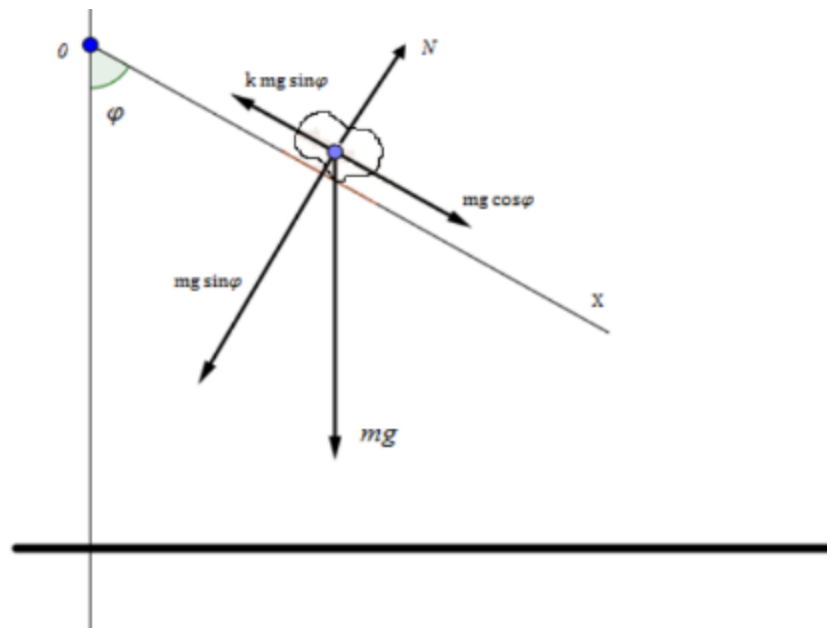


Рисунок 2.14 – Частинка на похилій площині

Це дозволяє записати закон руху в такому вигляді:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = mg \cos \varphi - k mg \sin \varphi \quad (2.19)$$

де:

m - маса суміші на лопатях активатора, кг;

g - прискорення вільного падіння, м/с²;

k - коефіцієнт тертя.

Після скорочення на величину маси отримуємо шуканий вираз:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = g(\cos \varphi - k \sin \varphi) = g^* \quad (2.20)$$

Якщо до цього рівняння додати початкові умови $s_0 = 0$ та $v_0 = 0$, то отримаємо розв'язок для швидкості ковзання:

$$v(t) = v_0 + g^* t \quad (2.21)$$

та для пройденого шляху:

$$x(t) = v_0 t + \frac{1}{2} g^* t^2 \quad (2.22)$$

де t - час, с.

Звідси знаходимо час перебування частинки на похилій площині:

$$x(t) = L \Rightarrow t^* = \frac{-v_0 + \sqrt{v_0^2 + 2g^*L}}{g^*} \quad (2.23)$$

До цього моменту частинка набуде швидкості, з якою вона залишає лопать активатора:

$$v_n = v(t^*) = v_0 + g^* t^* \quad (2.24)$$

Знайдемо координати точки на поверхні суміші, куди потрапить ця частинка наприкінці свого вільного падіння. Якщо H — висота точки підвісу механічного активатора, то висота падіння дорівнює $H - L \cos \varphi$. Тоді час падіння є розв'язком рівняння:

$$v_n \cos \varphi t + \frac{1}{2} g t^2 = H - L \quad (2.25)$$

де H - висота, м;

L - довжина, м.

Розв'язок цього рівняння:

$$t_n = \frac{-v_n \cos \varphi + \sqrt{v_n^2 \cos^2 \varphi + 2g(H - L \cos \varphi)}}{g} \quad (2.26)$$

дозволяє знайти і саму точку падіння:

$$L \sin \varphi + v_n \sin \varphi t_n \quad (2.27)$$

Тепер найменший і найбільший кут повороту механічного активатора визначаються розв'язком такої системи:

$$\begin{cases} L \sin \varphi + v_n \sin \varphi t_n \\ L \sin \varphi + v_n \sin \varphi t_n \end{cases} \quad (2.28)$$

2.4 Висновки

У результаті виконаних теоретичних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Змішувач концентрованих кормів повинен містити бункер для зерна та шнек. Шнек має забезпечувати циркуляцію зерна в бункері, забираючи його з нижньої частини та подаючи у верхню. Перед потраплянням у бункер корм повинен потрапляти на лопаті механічного активатора, який рівномірно розподіляє його по поверхні бункера, що значно підвищує інтенсивність процесу змішування.

2. Теоретичні дослідження показали, що ефективність процесу змішування значною мірою залежить від зони подачі корму в зерновий бункер, яка формується механічним активатором. Зокрема: якщо ліва межа зони подачі розташована на відстані 0,02 м, а права – 0,17 м, середній час одного циклу обертання суміші становить 210 секунд, при цьому коефіцієнт варіації дорівнює 0,466. Коли межі зони зміщуються до 0,05 м і 0,15 м, час одного циклу скорочується до 72 секунд, але коефіцієнт варіації збільшується до 0,819.

3. Теоретично обґрунтовано оптимальні параметри роботи механічного активатора: середня швидкість зерна, що потрапляє на його поверхню, повинна складати 0,05 м/с. довжина лопатей активатора має бути 0,19 м. висота розташування активатора над рівнем зерна у бункері повинна становити 0,2 м. частота коливань активатора не повинна перевищувати 1,5 Гц.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛАБОРАТОРНОГО ЗРАЗКА ЗМІШУВАЧА

3.1 Програма лабораторних досліджень

У сучасних умовах виникає необхідність забезпечення продовольчої безпеки нашої країни. У зв'язку з цим процеси виробництва, заготівлі, зберігання та приготування кормів для сільськогосподарських тварин набувають особливої значущості. До використовуваних машин, зокрема змішувачів концентрованих кормів, висувається низка вимог, які мають особливе значення для їхнього виробництва. Основними вимогами є:

- низька енергоємність технологічного процесу;
- універсальність;
- можливість швидкої зміни рецептури приготовлених кормів;
- високі ергономічні та експлуатаційні властивості;
- висока технічна надійність;
- відсутність втрат, псування, а також подрібнення компонентів кормової суміші.

Запропонована нами конструкція змішувача має відповідати наведеним вище вимогам і забезпечувати якісне приготування багатокомпонентних сухих концентрованих кормів. За необхідності, змішувач повинен збагачувати кормову суміш сипучими преміксами та жиророзчинними кормовими добавками, що вводяться у незначних кількостях.

Фізико-механічні властивості суміші концентрованих кормів визначаються багатьма факторами, які можна поділити на керовані та некеровані. До основних з них відносяться:

- вологість та температура компонентів суміші – ці фактори впливають на текучість і змішуваність компонентів.

- ступінь очищення зерна від пилоподібних частинок – наявність пилу може погіршити якість суміші, адже він утруднює рівномірний розподіл компонентів.

- розміри окремих зерен у зерновій масі – різні розміри частинок можуть призводити до неоднорідності суміші.

- ступінь подрібнення компонентів зернової суміші – чим дрібніші частки, тим легше їх змішати та рівномірно розподілити.

Кількісне співвідношення компонентів суміші – правильне пропорційне співвідношення інгредієнтів є ключовим для досягнення необхідних фізико-хімічних властивостей корму. Значний вплив на властивості приготовленої суміші мають також конструктивно-технологічні особливості змішувача.

Конструктивні особливості змішувачів визначаються, серед іншого, культурою їхнього виробництва, допустимими відхиленнями та допусками. Наприклад, через неточності виготовлення та складання можуть відрізнятися кути намотування шнека та відстань між стінкою робочої камери і намотуванням шнека.

Зважаючи на вищезгадані фактори, можна зробити висновок, що повне аналітичне обґрунтування конструктивно-технічних характеристик розробленої установки є лише орієнтовним, оскільки багато процесів, що відбуваються під час змішування, мають ймовірнісний характер. Для того, щоб впевнено визначити оптимальні параметри та режими роботи змішувача концентрованих кормів, необхідно провести експериментальні дослідження, що дозволять більш точно оцінити ефективність його роботи та коригувати конструкцію та параметри установки перед виготовленням промислового зразка.

Як критерії оптимізації, які дозволяють оцінити ефективність робочого процесу змішувача сухих концентрованих кормів, можна прийняти такі:

- продуктивність Q (кг/с) і енергоємність E (кВт·год/т) робочого процесу;

- тривалість робочого процесу t , хв, яка забезпечує досягнення необхідного ступеня коефіцієнта варіації суміші λ , %, що характеризує якість приготовленого корму.

Теоретичне дослідження запропонованої конструкції змішувача концентрованих кормів, а також аналіз відомих теорій змішування дозволяють стверджувати, що найбільш доцільно програму досліджень проводити у два етапи. На першому етапі необхідно встановити параметри та режими роботи шнека. На другому етапі – вивчити вплив конструктивно-технологічних параметрів механічного активатора і режимів його роботи на якість приготування суміші концентрованих кормів.

Для обґрунтування основних конструктивно-технологічних параметрів робочого процесу запропонованого змішувача концентрованих кормів необхідно реалізувати таку програму досліджень:

Необхідно дослідити, як спільно впливають частота обертання робочого шнека, кут його нахилу до вертикалі в напрямку до завантажувального отвору, а також ступінь відкриття перепускного вікна на продуктивність та енергоємність процесу роботи лабораторного змішувача без активатора. Завдання полягає в розробці математичних моделей, які дозволяють описати вплив цих факторів на продуктивність і енергоємність. Крім того, потрібно визначити оптимальні значення цих факторів, при яких досягається максимальна продуктивність робочого шнека.

Також необхідно встановити, як залежить якість змішування, що вимірюється через коефіцієнт варіації зернової суміші, від часу технологічного процесу. Це потрібно зробити як за відсутності активатора, так і при різних значеннях зазначених факторів.

3.2 Методика експериментальних досліджень

Для проведення лабораторних досліджень був створений експериментальний зразок змішувача концентрованих кормів. На рисунку 3.1

показано загальний вигляд змішувача з активатором. Детальніше зображення внутрішньої будови змішувальної камери та конструкції механічного активатора можна побачити на рисунку 3.2.

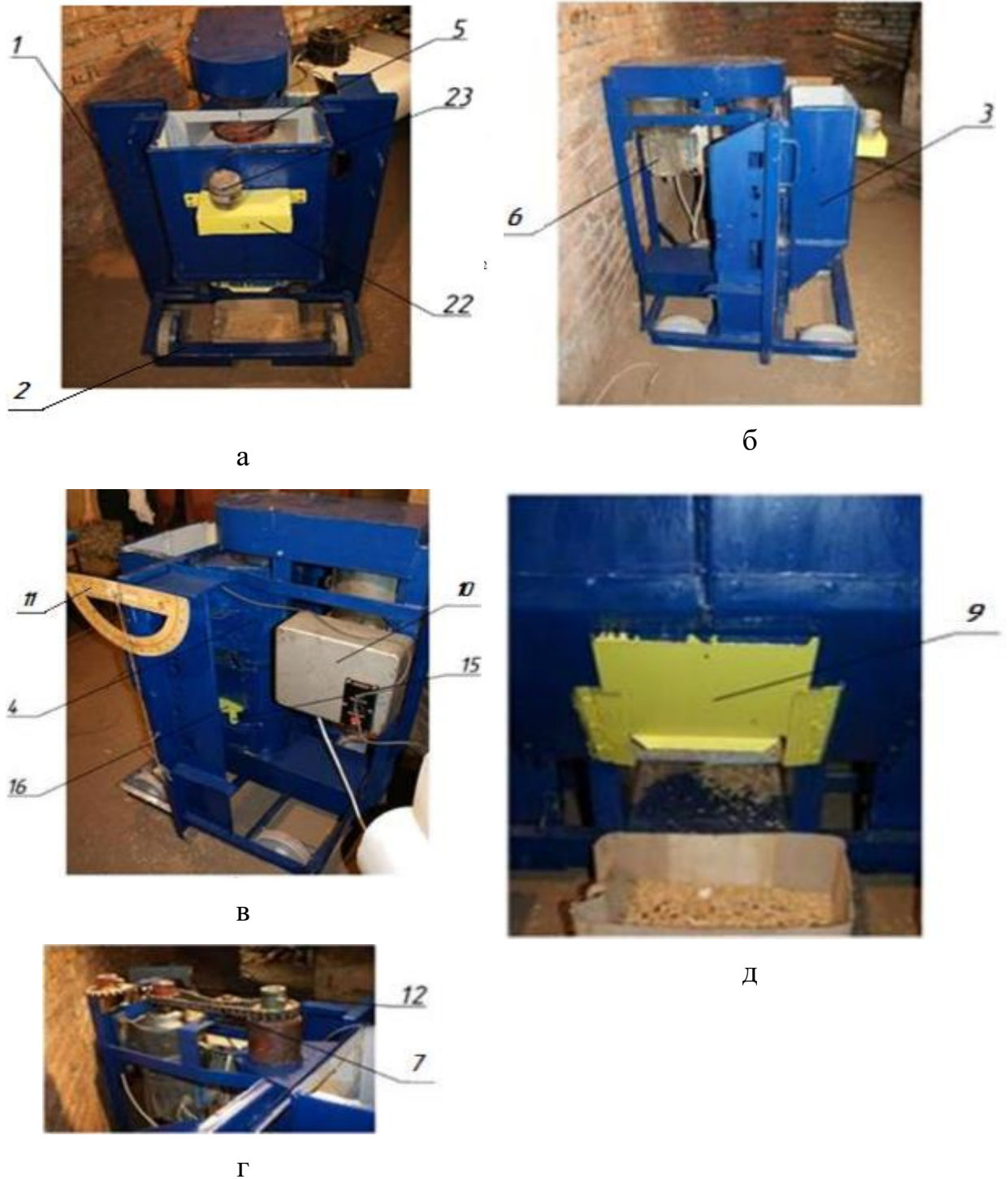


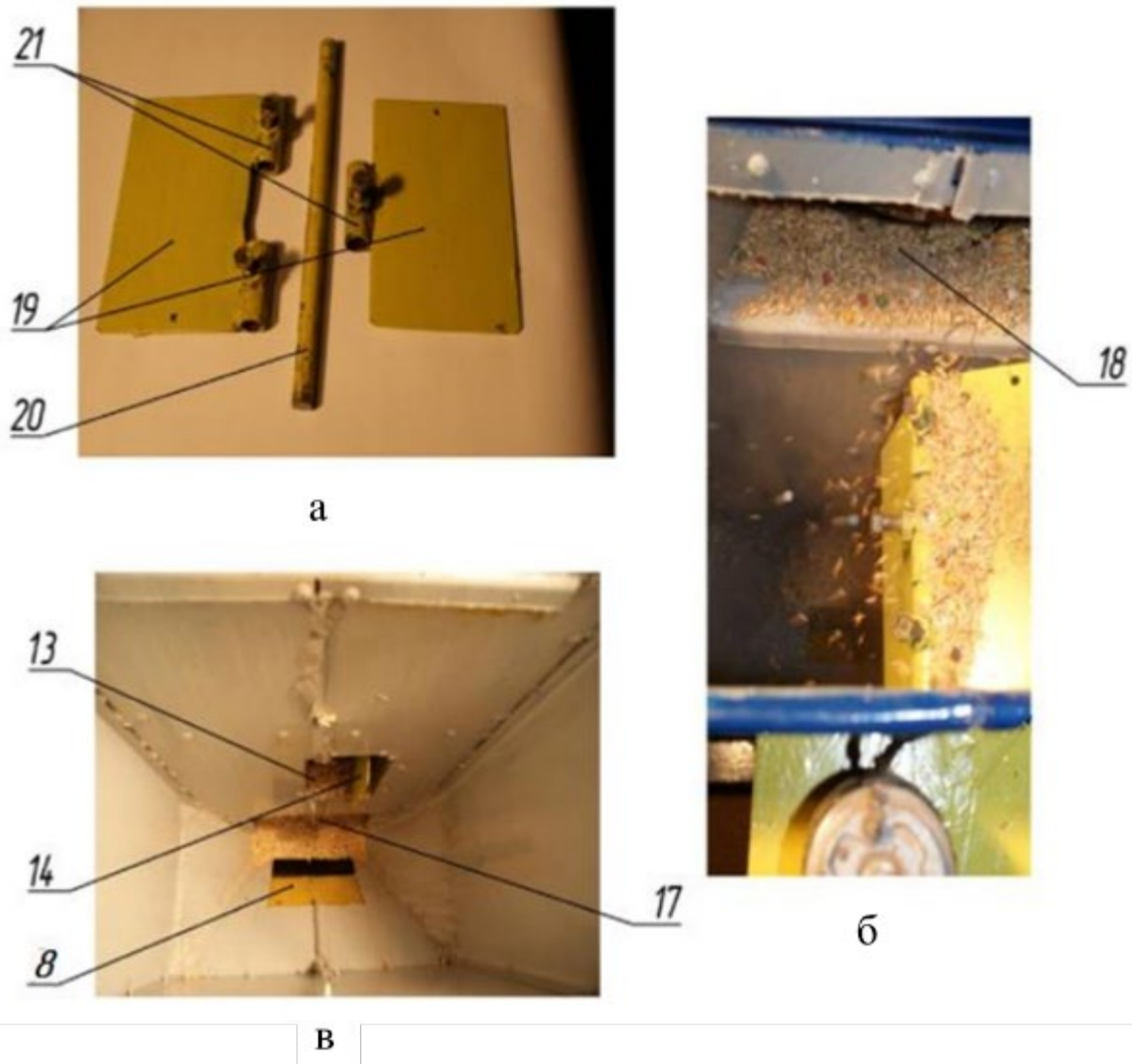
Рисунок 3.1 – Загальний вигляд змішувача концентрованих кормів

Змішувач складається з рами 1 (рисунок 3.1), яка розташована на рухомій платформі 2, на якій вертикально встановлений змішувальний бункер 3. В задній частині бункера кріпиться кожух 4, в середині якого знаходиться змішувальний шнек 5. Привод для шнека подається від електродвигуна 6 через ланцюгову передачу 7. В передній частині робочої камери є вивантажувальне вікно 8, що закривається шиберною заслінкою 9. Крім того, є пульт керування 10, який дозволяє запускати і зупиняти електродвигун та змінювати його напрямок обертання.

Корпус змішувача оснащений механізмом, який дозволяє змінювати кут нахилу робочого шнека 5 від вертикалі в межах $\pm 15^\circ$. Також є система для контролю величини нахилу шнека 11.

Конструкція механічного активатора, як показано на рисунку 3.2-а, складається з двох лопатей-пластин 19, які закріплені на валу 20. Пластини оснащені регулювальними втулками 21, що дають змогу змінювати їхнє розташування на валу під потрібним кутом. У передній частині установки знаходиться шатунно-кривошипний механізм 22, який служить для приводу активатора і оснащений електродвигуном 23. Цей механізм забезпечує зворотно-поступальні рухи активатора навколо його осі, що сприяє покращенню процесу змішування.

Кожух шнека з'єднаний з робочою камерою через перепускне вікно 13. Розмір цього вікна можна регулювати за допомогою заслінки 14, яка керується ручкою 15, та фіксувати в необхідному положенні завдяки спеціальному пристрою 16. В нижній частині змішувального бункера 3 розташоване вікно 17, через яке зерно подається до лопатей шнека 5. В верхній частині бункера є вивантажувальне вікно 18, що дозволяє відводити зерно з циркулюючого потоку. Змішувач також оснащений додатковою шестірнею 12, яка дає можливість регулювати частоту обертання шнека і змінювати його крутний момент, що дозволяє варіювати інтенсивність процесу змішування в залежності від потреб.



а – механічний активатор (у розібраному стані); б – механічний активатор під час роботи; в – робоча камера змішувача із демонтованим активатором.

Рисунок 3.2 – Вид змішувального бункера змішувача концентрованих кормів

Для забезпечення точності експериментальних досліджень дослідний зразок змішувача був оснащений різноманітними контрольними та вимірювальними приладами, такими як датчики температури, вологомірні прилади, а також засоби для моніторингу параметрів обертання шнека і активатора. Це дозволяє точно налаштувати і контролювати процеси

змішування, а також збирати дані для подальшого аналізу ефективності роботи змішувача та впливу різних параметрів на кінцеву якість змішаного корму.

3.3 Результати експериментальних досліджень

Розглянемо результати проведених досліджень, які стосуються впливу таких факторів, як частота обертання робочого шнека (x_1), кут його нахилу відносно вертикалі щодо завантажувального отвору (x_2), а також ступінь відкриття перепускного вікна (x_3), що розташоване посередині кожуха шнека. Ці параметри впливають на продуктивність (Q , кг/с) та енергоємність (E , кВт·год) процесу змішування при відсутності активатора.

Для перевірки точності та відтворюваності результатів експериментів було використано критерій Кохрена, що дозволив оцінити дисперсію отриманих даних на рівні значущості $\alpha=0,05$. Після отримання позитивного результату (який підтвердив стабільність експериментальних даних), ці значення були використані для проведення регресійного аналізу, з метою побудови математичних моделей, що описують залежність продуктивності та енергоємності від досліджуваних факторів.

Статистична обробка експериментальних даних була виконана за допомогою математичного програмного пакету MathCAD 14.0, що дозволило точно визначити емпіричні залежності між змінними. Результати цієї обробки представлені у вигляді двох основних математичних моделей, які описують продуктивність і енергоємність процесу змішування (формули (3.1) та (3.2)).

Ці моделі дозволяють прогнозувати поведінку змішувача в залежності від заданих параметрів, а також оптимізувати параметри роботи для досягнення максимальної продуктивності при мінімальних енергетичних витратах. Також, на основі отриманих результатів, можна розробити рекомендації щодо налаштування робочих параметрів змішувача для покращення ефективності технологічного процесу.

$$Q(x_1, x_2, x_3) = 0,131 - 0,00467x_1 - 0,0094x_2 + 0,00054x_3 + 0,00056x_1x_2 + 0,000052x_1^2 - 0,000007x_3^2 \quad (3.1)$$

$$E(x_1, x_2, x_3) = 2,724 - 0,0412x_1 - 0,3204x_2 + 0,0026x_3 + 0,0018x_1x_2 - 0,0004x_2x_3 + 0,0002x_1^2 + 0,0153x_2^2 \quad (3.2)$$

Обидві математичні моделі були перевірені на адекватність за допомогою критерію Фішера при рівні значущості $\alpha=0,01$, що підтвердило їх правильність та достовірність.

Аналіз емпіричного рівняння (3.1) показав, що всі три фактори мають значний вплив на продуктивність робочого шнека, що підтверджується рівнем статистичної значущості $\alpha=0,1$. Найбільший вплив на продуктивність виявив фактор x_2 — кут нахилу шнека, про що свідчить його лінійний коефіцієнт. Це означає, що зміни в цьому параметрі значною мірою впливають на ефективність роботи шнека. На другому місці за впливом стоїть частота обертання шнека (x_1), яка також виявляє помітний ефект. Фактор x_3 — ступінь відкриття перепускного вікна має найменший, але все ж статистично значущий вплив на продуктивність.

Для оптимізації роботи змішувача було проведено аналіз факторного простору. Метою було визначити такі значення факторів, при яких продуктивність досягне максимального значення. Процес оптимізації передбачає пошук оптимальних параметрів, які дозволяють забезпечити найвищу продуктивність з урахуванням взаємного впливу кожного з факторів. Це дозволяє встановити оптимальні умови для роботи змішувача, що може сприяти підвищенню ефективності технологічного процесу та зниженню енергетичних витрат.

$$Q_{\max}(x_1, x_2, x_3) = Q(70, 9, 41) = 0,339$$

Отже, було встановлено, що максимальна продуктивність досягається при наступних значеннях факторів: частота обертання шнека $x_1 = 70$ об/хв, кут нахилу шнека $x_2 = 9^\circ$ та ступінь відкриття перепускного вікна $x_3 = 41^\circ$. При цих умовах продуктивність досягає $0,339$ кг/с. Критерій оптимізації досягає максимального значення на межах досліджуваного факторного простору.

Для наочного представлення отриманої емпіричної залежності (3.18) були побудовані тривимірні графіки (рисунки 3.13, 3.14, 3.15), на яких один з факторів фіксувався на оптимальному рівні, що дозволяло наглядно продемонструвати взаємний вплив інших параметрів на продуктивність.

Аналізуючи ці графіки, можна зробити висновок, що фактори "кут нахилу шнека від вертикалі" і "ступінь відкриття перепускного вікна" мають майже лінійний вплив на процес змішування. Це означає, що змінюючи ці два параметри, можна значною мірою регулювати продуктивність змішувача, досягаючи оптимальних результатів за мінімальних змін інших факторів.

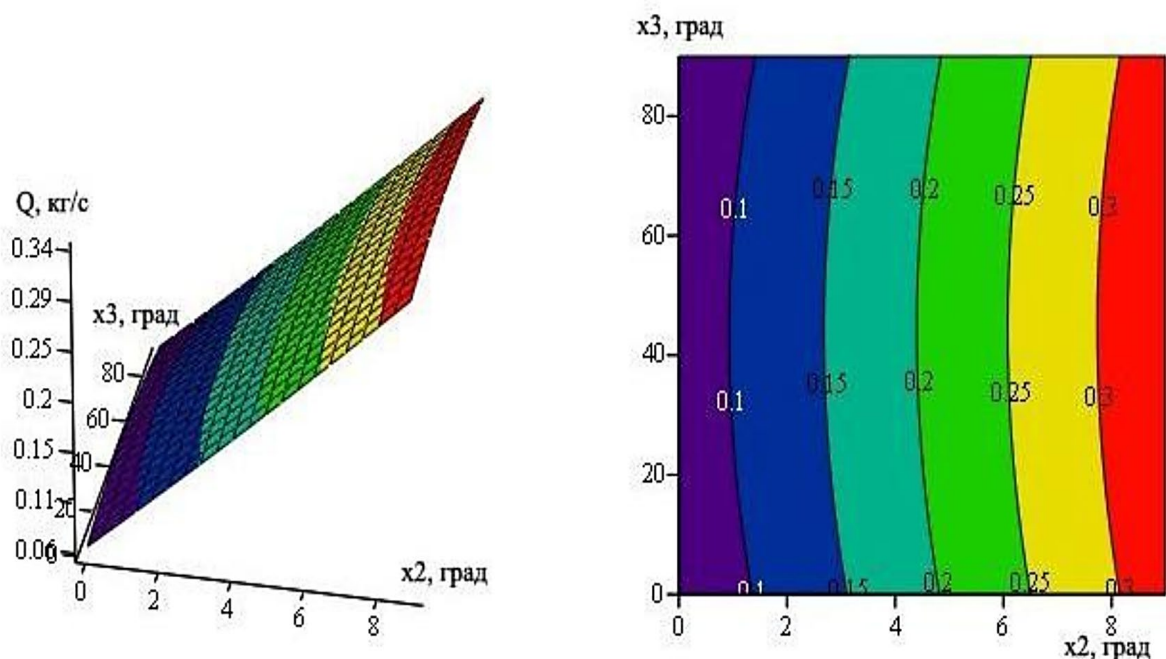


Рисунок 3.3 – Залежність продуктивності процесу від кута нахилу шнека та кута відкриття

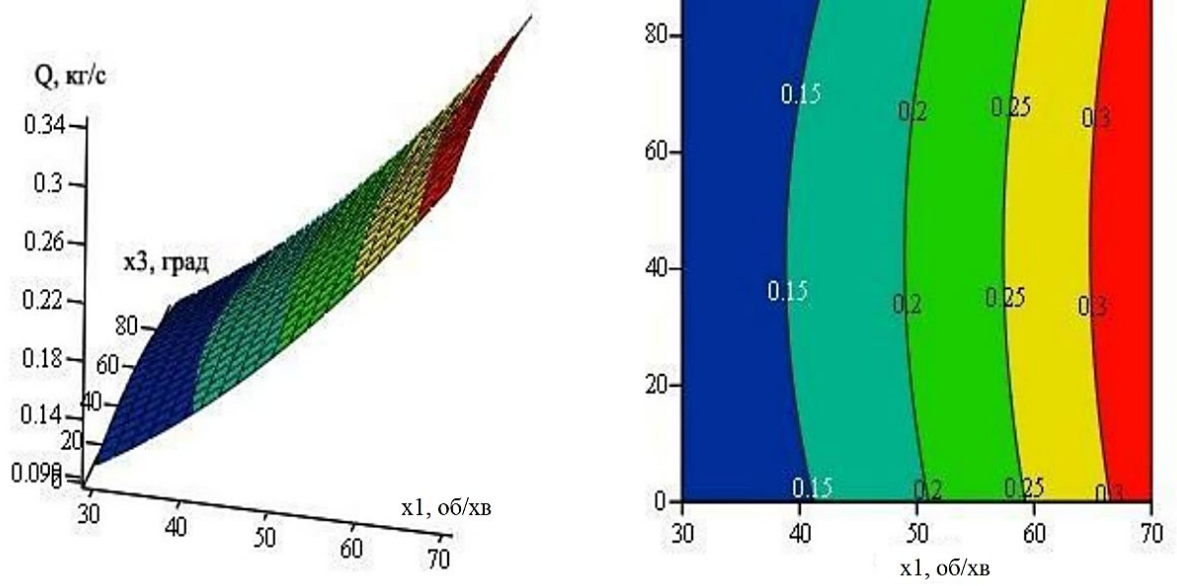


Рисунок 3.4 – Залежність продуктивності процесу від частоти обертання та кута відкриття заслонки

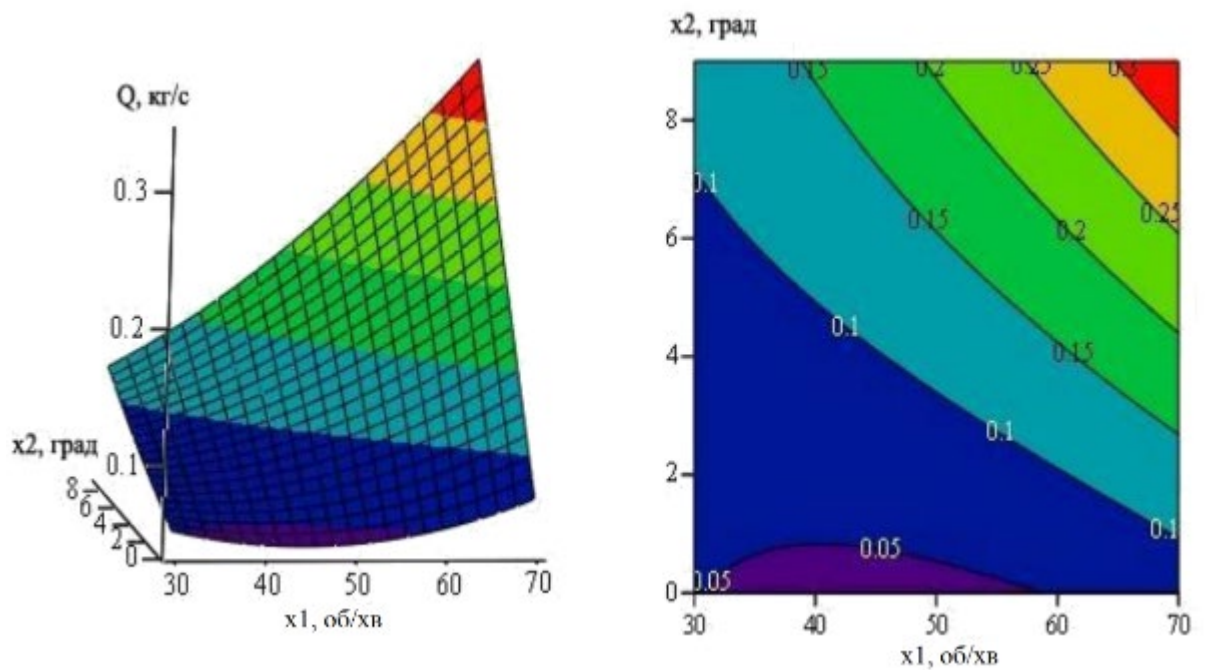


Рисунок 3.5 – Залежність продуктивності процесу Q від частоти обертання шнека та кута нахилу шнека

При спільному впливі частоти обертання шнека і кута відкриття перепускного вікна на продуктивність Q , кг/с, спостерігається степенева залежність. Це означає, що зміна цих двох факторів одночасно викликає значні коливання продуктивності, що підкреслює важливість їх комбінованого налаштування для оптимізації роботи змішувача. Однак квадратичні ефекти проявляються, коли враховуються частота обертання шнека і кут його нахилу, що вказує на наявність нелінійних взаємодій між цими параметрами.

Перед проведенням експериментів щодо впливу досліджуваних факторів на енергоємність E , кВт·год/т, були проведені вимірювання споживаної потужності установки для різних частот обертання шнека. Отримані результати були занесені до таблиці, де також містились дані при роботі установки з зерном. Це дозволило зібрати необхідну інформацію для подальшого аналізу енергоємності процесу.

Аналіз емпіричного рівняння (3.2) показав, що найбільший вплив на енергоємність E має кут нахилу шнека відносно вертикалі. Всі фактори значною мірою впливають на енергоємність, однак взаємодія частоти обертання шнека та кута відкриття перепускного вікна виявилась статистично незначущою, і тому була виключена з моделі.

Оптимізація моделі для енергоємності визначила значення факторів, при яких величина енергоємності досягає мінімуму: $E_{\min}(x_1, x_2, x_3) = E(70, 7.54, 90) = 0.178$. Таким чином, мінімальна енергоємність $E = 0.178$ кВт·год/т досягається при таких значеннях факторів: $x_1 = 70$ об/хв, $x_2 = 7.54^\circ$, $x_3 = 90^\circ$.

Для візуалізації отриманих емпіричних залежностей були побудовані тривимірні поверхні (рисунки 3.6, 3.7, 3.8), на яких один із факторів фіксувався на оптимальному рівні, що дозволяло наочно продемонструвати взаємний вплив інших параметрів на енергоємність.

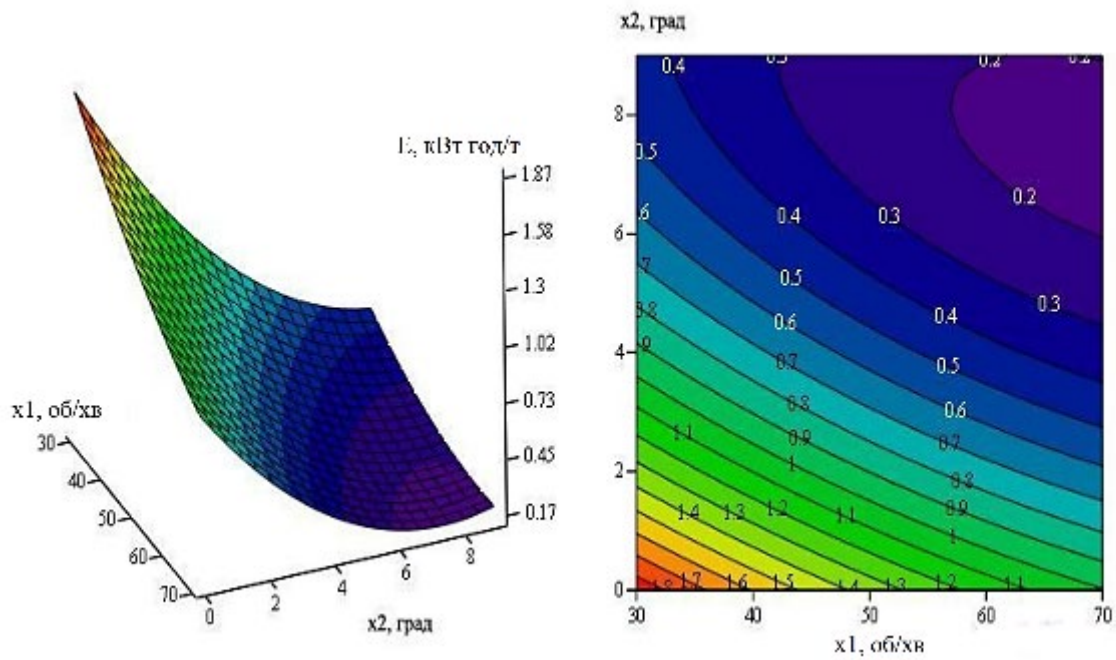


Рисунок 3.6 – Залежність енергоємності процесу E від частоти обертання та кута нахилу шнека

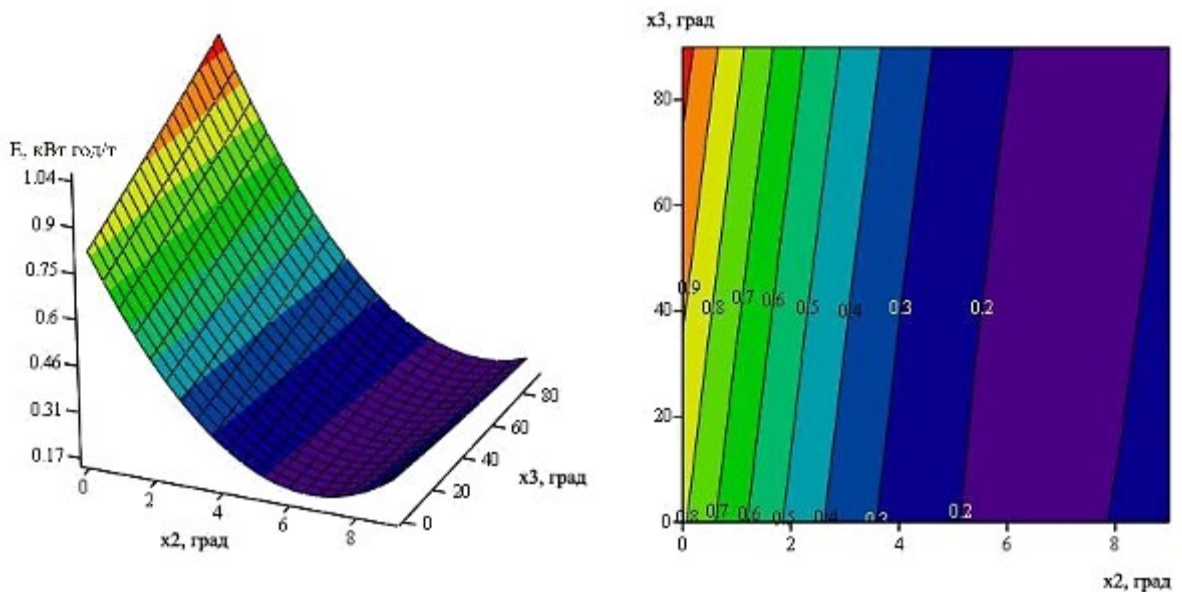


Рисунок 3.7 – Залежність енергоємності процесу E від кута нахилу шнека і кута відкриття заслонки

Порівняння результатів, представлених на графіках 3.3-3.5 і 3.6-3.8, а також їх оптимізації показує, що продуктивність Q досягає максимального значення при частоті обертання шнека $n=70$ об/хв, тоді як енергоємність E

мінімізується при тих же значеннях частоти, що підтверджує важливість налаштування цієї величини для досягнення оптимальних результатів у процесі змішування.

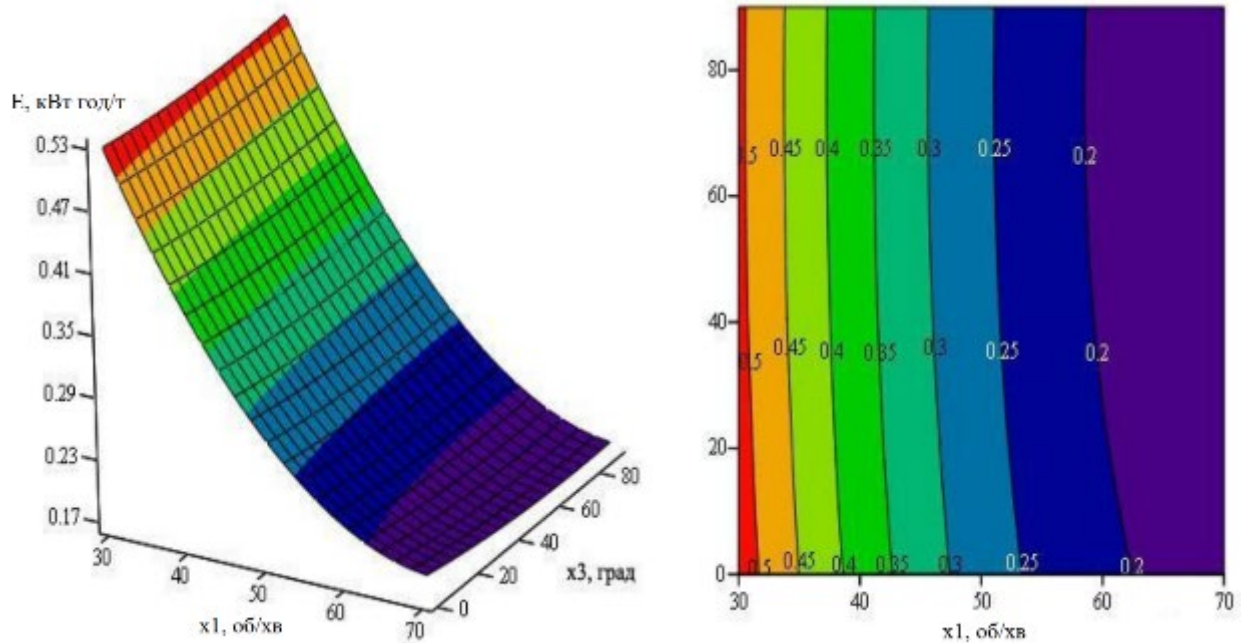


Рисунок 3.8 – Залежність енергоємності процесу E від частоти обертання шнека і кута відкриття заслонки

Величина кута нахилу шнека від вертикалі, що забезпечує мінімальну енергоємність E , на $1,5^\circ$ менша порівняно з кутом, при якому досягається максимальна продуктивність Q . Крім того, кут відкриття перепускного вікна для мінімальної енергоємності на 49° більший, ніж при максимальній продуктивності. Ці відмінності в параметрах показують, як різні цілі - максимізація продуктивності і мінімізація енергоємності - вимагають налаштування різних значень факторів для досягнення оптимальних результатів.

Дослідження впливу часу на якість змішування без використання активатора проводилося при умовах, що забезпечують максимальну

продуктивність $Q=0.339$ кг/с. Це поєднання факторів було раніше встановлено і відповідало значенням: частота обертання шнека $x_1=70$ об/хв, кут нахилу шнека $x_2=9^\circ$ та величина відкриття перепускного вікна $x_3=41^\circ$.

У цьому режимі енергоємність процесу EE , що розраховується за емпіричною залежністю (3.2), виявляється більшою за мінімальне значення, оскільки налаштування на максимальну продуктивність впливає на збільшення енергоємності.

Для оцінки якості змішування без активатора було побудовано регресійне рівняння, яке описує залежність коефіцієнта варіації суміші λ від часу t процесу змішування:

$$\lambda(t)=26.38+7.48 \cdot t-0.23 \cdot t^2, R^2=0.933 \quad (3.3)$$

Ця регресійна залежність графічно представлена на рисунку 3.9. З графіка видно, що при оптимальних значеннях частоти обертання шнека, кута його нахилу і ступеня відкриття перепускного вікна, змішувач без активатора досягає задовільної якості суміші з коефіцієнтом варіації $\lambda=90\%$ вже після 13 хвилин роботи. Після цього процес стабілізується, і лише через наступні 6 хвилин спостерігається незначне зростання коефіцієнта варіації. Це свідчить про те, що процес змішування стабільний після досягнення певного часу роботи, і додаткове змішування не призводить до значних змін у якості суміші.

Ці результати демонструють, що при оптимальних значеннях параметрів змішувача без активатора можна досягти бажаного рівня якості суміші, зберігаючи стабільність процесу і забезпечуючи ефективне використання енергії.

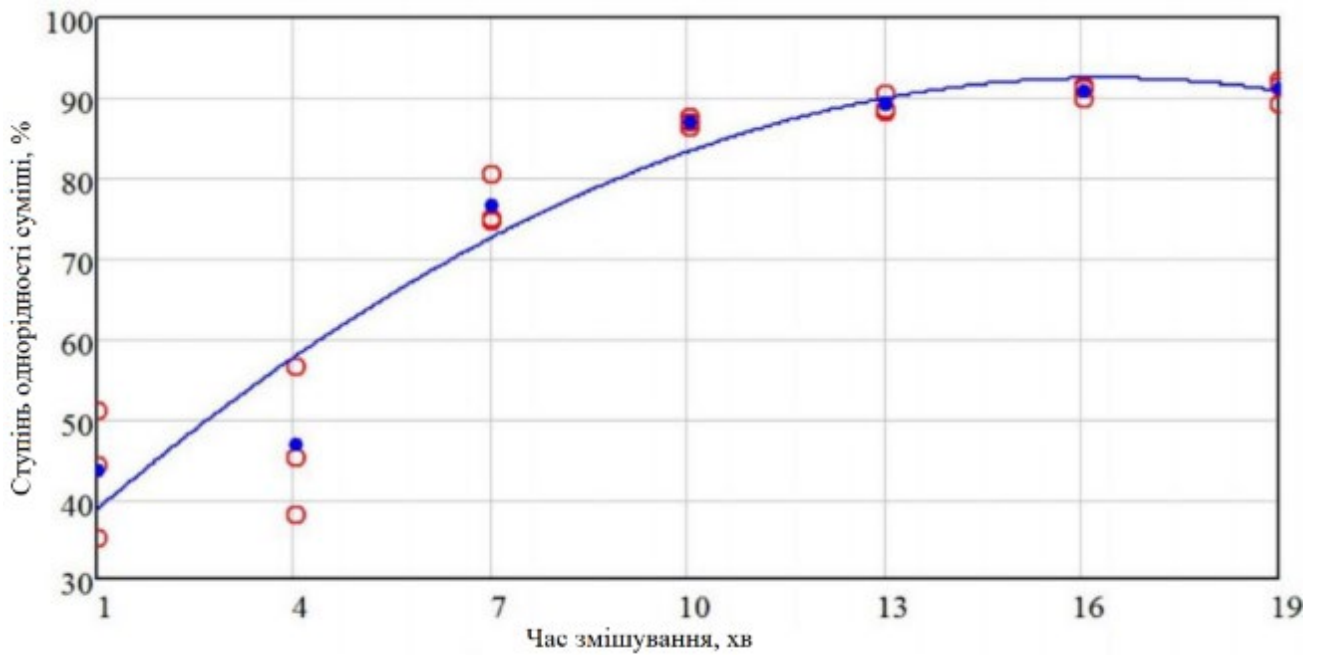


Рисунок 3.9 – Залежність показника коефіцієнта варіації суміші λ , %, від тривалості процесу змішування t , хв.

3.4 Висновки

За результатами проведених лабораторних досліджень змішувача концентрованих кормів можна зробити такі основні висновки:

Отримані математичні моделі, які описують вплив частоти обертання робочого шнека (x_1), кута його нахилу відносно вертикалі вихідної горловини (x_2) та ступеня відкриття перепускного вікна (x_3), розташованого в середині кожуха шнека, на продуктивність Q (кг/с) та енергоємність E (кВт·год/т). Дослідження показали, що максимальна продуктивність досягається при значеннях: $x_1=70$ об/хв, $x_2=9$, $x_3=41$, коли продуктивність досягає 0,339 кг/с. У той же час мінімальна енергоємність $E=0,178$ кВтгод/т при $x_1=70$ об/хв, $x_2=7,54$, $x_3=90$.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Загальні вимоги охорони праці на комбікормових підприємствах

Загальні вимоги охорони праці на комбікормових підприємствах визначаються нормативно-правовою базою України та Європейського Союзу і спрямовані на забезпечення безпечних та здорових умов праці для всіх працівників підприємств. Основними нормативно-правовими актами в Україні є Закон України "Про охорону праці" (№ 2694-ХІІ від 14 жовтня 1992 року) та Народна інструкція з охорони праці на підприємствах (НПАОП 0.00-4.12-04). Крім того, існують Державні санітарні правила та норми (ДСанПіН 2.2.2.543-96), що регламентують шкідливі фактори виробничих процесів, а також вимоги безпеки на комбікормових підприємствах.

Перш за все, необхідно проводити оцінку ризиків для здоров'я працівників, що включає виявлення потенційних небезпек, таких як пил, токсичні речовини, шум, а також травми при роботі з механізмами та обладнанням. Це регулюється Порядком проведення оцінки ризиків для здоров'я працівників, який затверджений Міністерством охорони здоров'я України. Виявлені небезпеки повинні бути усунуті або мінімізовані відповідно до вимог Нормативів максимально допустимих концентрацій (НМДК), що регламентують допустимі рівні пилу та газів у виробничих приміщеннях.

Забезпечення безпеки працівників при роботі з механізмами на комбікормових підприємствах передбачає встановлення захисних огорожень, засобів безпеки та технічних запобіжних пристроїв для захисту працівників від травм. Ці вимоги відображені у ДСТУ 3947-2015 (Системи управління безпекою праці на підприємствах) та ГОСТ 12.2.003-91 (Охорона праці. Загальні вимоги до безпеки машин і механізмів).

Відповідно до вимог Директиви ЄС 89/391/ЄЕС "Про охорону праці на роботі", підприємства повинні мати ефективну систему вентиляції для зниження рівня пилу та токсичних газів у робочих приміщеннях. Для

забезпечення здоров'я працівників на комбікормових підприємствах використовуються фільтраційні установки, які відповідають європейським стандартам EN 779:2012 щодо ефективності фільтрації повітря.

Забезпечення працівників засобами індивідуального захисту є обов'язковим. Вони повинні бути забезпечені спецодягом, рукавичками, касками, респіраторами та іншими засобами захисту відповідно до ГОСТ 12.4.010-75 (Засоби індивідуального захисту), а також Директиви ЄС 89/656/ЄЕС про мінімальні вимоги до засобів індивідуального захисту.

Періодичне навчання та інструктажі з охорони праці є важливими складовими забезпечення безпеки на комбікормових підприємствах. Всі працівники повинні проходити вступний та настановчий інструктаж, що регламентується Порядком проведення навчання з охорони праці, затвердженим Міністерством охорони праці України, а також стандартами ЄС, що передбачають підвищення обізнаності працівників щодо безпеки на виробництві.

Таким чином, дотримання вимог охорони праці, що прописані в національних нормативно-правових актах України та європейських стандартах, дозволяє забезпечити безпечну та здорову роботу на комбікормових підприємствах, мінімізуючи ризики для працівників і забезпечуючи відповідність вимогам законодавства.

4.2 Інструкція з охорони праці при роботі зі змішувачем комбікорму

1. Загальні положення

1.1. Ця інструкція призначена для забезпечення безпеки працівників при роботі зі змішувачем комбікорму (далі - змішувач), а також для запобігання нещасним випадкам, професійним захворюванням та аваріям на робочому місці.

1.2. Всі працівники, які обслуговують змішувач комбікорму, повинні пройти відповідне навчання та інструктаж з охорони праці.

1.3. Для забезпечення безпеки на робочому місці необхідно дотримуватись вимог цієї інструкції, а також загальних вимог охорони праці, передбачених нормативно-правовими актами України та міжнародними стандартами.

2. Вимоги безпеки перед початком роботи

2.1. Перед початком роботи зі змішувачем комбікорму необхідно перевірити:

- наявність і справність засобів індивідуального захисту (респіратор, рукавички, спецодяг, захисні окуляри, каска);
- відсутність несправностей у змішувачі (перевірка технічного стану обладнання, огляд механізмів, стан шнеків і лопатей, електричні з'єднання);
- правильність установки змішувача та його закріплення;
- перевірити відсутність сторонніх предметів у камері змішування;
- заземлення обладнання.

2.2. Ознайомитись з документацією на змішувач комбікорму (паспорт, технічне обслуговування, інструкції).

2.3. Переконатись, що всі органи управління змішувачем знаходяться у безпечному положенні.

3. Вимоги безпеки під час роботи

3.1. Під час роботи зі змішувачем необхідно дотримуватись таких вимог:

- не допускається роботи на змішувачі без засобів індивідуального захисту;
- стежити за правильністю завантаження сировини в змішувач, не допускати перевантаження;
- перевіряти, щоб усі захисні огороження на змішувачі були закриті і надійно зафіксовані;
- не залишати змішувач без нагляду в процесі роботи;
- не торкатися рухомих частин машини під час її роботи;

- дотримуватись безпечної відстані від обертових частин та механізмів;

- не допускати попадання води та іншої рідини на електричні частини змішувача.

3.2. Під час роботи з електричними елементами змішувача слід:

- перевіряти електричну мережу на наявність пошкоджень;
- за необхідності вимикати подачу електроенергії перед виконанням

будь-яких ремонтних робіт.

4. Вимоги безпеки після закінчення роботи

4.1. Після закінчення роботи зі змішувачем комбікорму:

- вимкнути електричне живлення;
- переконатись, що всі механізми зупинені, і змішувальне

обладнання не знаходиться під навантаженням;

- очистити змішувач від залишків комбікорму та пилу;
- провести огляд змішувального обладнання на наявність зношених

або пошкоджених частин;

- забезпечити правильне зберігання та укладання інструментів і

обладнання.

5. Вимоги безпеки при виконанні технічного обслуговування та ремонту

5.1. Технічне обслуговування та ремонт змішувача проводити тільки після вимкнення його від електричної мережі та наявності необхідних засобів індивідуального захисту.

5.2. Всі роботи з ремонту чи заміни запчастин проводити тільки уповноваженими працівниками, які мають відповідну кваліфікацію.

5.3. Не допускається самостійне виконання ремонтних робіт без належного інструменту та обладнання.

5.4. Всі інструменти та запасні частини для ремонту змішувача повинні відповідати вимогам технічного регламенту.

6. Вимоги безпеки при виникненні аварійних ситуацій

6.1. У разі виявлення несправностей або аварійних ситуацій під час роботи змішувача, необхідно:

- негайно вимкнути обладнання за допомогою аварійного вимикача;
- повідомити про ситуацію керівника або відповідальних осіб;
- евакуювати працівників з небезпечної зони;
- надавати першу допомогу потерпілим при необхідності.

6.2. Для попередження виникнення аварійних ситуацій необхідно проводити регулярне навчання та інструктажі працівників щодо дій у разі виникнення аварійних ситуацій.

7. Вимоги до приміщення

7.1. Приміщення, де знаходиться змішувач, повинно бути добре провітрюваним для запобігання накопиченню пилу та токсичних газів.

7.2. Охорона праці на робочих місцях з високою концентрацією пилу або токсичних речовин повинна відповідати вимогам ДСанПіН 2.2.2.543-96.

7.3. Зазначене приміщення повинно бути забезпечене системою вентиляції та кондиціонування, що відповідає вимогам безпеки.

8. Відповідальність за порушення інструкції

8.1. Порушення вимог цієї інструкції може призвести до нещасних випадків або аварій.

8.2. Працівники, які порушують вимоги цієї інструкції, несуть відповідальність відповідно до Законів України "Про охорону праці" та інших нормативно-правових актів.

4.3 Висновки по розділу

Дотримання вимог охорони праці при роботі зі змішувачами критично важливе для запобігання травмам та професійним захворюванням. Інструкції, розроблені згідно з українським та європейським законодавством, забезпечують безпечні умови експлуатації обладнання.

5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОГО ЗМІШУВАЧА КОМБІКОРМІВ

5.1 Вихідні дані

У цьому розділі аналізується передбачувана економічна ефективність використання розробленого змішувача сипких кормів. Найближчим за характеристиками (зокрема, за продуктивністю та однорідністю змішування не нижче 96%) до розробленої моделі є серійний змішувач сипких кормів ЗКК-1,0, який обрано для порівняння. Порівняння економічних показників розробленого та серійного змішувачів проводитиметься за питомими експлуатаційними витратами, без врахування конкретних об'ємів змішування. Розрахунки виконуватимуться для однозмінного режиму роботи. Вихідні дані для розрахунків подано в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані до розрахунку техніко економічних показників

Показник	Варіанти	
	ЗКК-1,0	розроблений змішувач
1	2	3
Продуктивність, т/год.	1,0	1,2
Споживана потужність, кВт	1,5	1,1
Обслуговуючий персонал, люд.	1	1
Тривалість зміни, год.	8	8
Строк служби, років	11	11
Коефіцієнт амортизаційних відрахувань	0,9	0,9
Коефіцієнт відрахувань на ТО та ремонт	0,15	0,15
Балансова вартість, грн.	42000	-
Капітальні вкладення, грн.	-	14300

5.2 Розрахунок показників економічної ефективності

Порівняння змішувачів, зокрема базового та удосконаленого, буде проведено за питомими експлуатаційними витратами. До складу цих витрат входять різноманітні компоненти, такі як витрати на заробітну плату працівників, витрати на енергоресурси, амортизаційні відрахування, а також витрати на ремонт і технічне обслуговування обладнання. Для виконання розрахунків цих показників будемо використовувати методики та рекомендації, зазначені в [36].

Таблиця 5.2 - Показники економічної ефективності
розробленого змішувача

Показники	Варіанти		Проектовані у % до базового
	ЗКК-1,0	розроблений змішувач	
Продуктивність, т/год.	1	1,2	120,0
Встановлена потужність, кВт	1,5	1,1	73,3
Обслуговуючий персонал, люд.	1	1	100,0
Балансова вартість, грн.	42000	42000	-
Інвестиції в удосконалення, грн.	-	14300	-
Питомі експлуатаційні витрати, грн./т	136,76	113,75	83,2
Максимальне річне навантаження, т	-	1200	-
Економія питомих експлуатаційних	-	23,01	-
Економія експлуатаційних витрат, грн.	-	27612,1	-
Строк окупності інвестицій, років	-	0,5	-

5.3 Висновки

Техніко-економічна оцінка експериментального змішувача показала, що він має переваги в експлуатаційних витратах у порівнянні з базовим ЗКК-1,0. Річний економічний ефект від впровадження розробленого змішувача за 100% завантаження становить 27612,1 грн. У цьому випадку строк окупності складе всього 0,5 роки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розвиток конструкцій змішувачів спрямований на підвищення технічної надійності існуючих пристроїв при одночасному зниженні вартості виробництва концентрованого корму. Крім того, важливим завданням є створення змішувачів з розширеними функціональними можливостями, що забезпечують високі технологічні та ергономічні характеристики.

2. Теоретично встановлено, що інтенсивність процесу змішування залежить від зони подачі корму в зерновий бункер, створеної механічним активатором. Наприклад, при розташуванні лівої межі зони подачі на відстані 0,02 м, а правої – 0,17 м, середній час одного оберту суміші становить 210 с, а коефіцієнт варіації – 0,466. Якщо межі змінити на 0,05 м і 0,15 м, час оберту скорочується до 72 с, проте коефіцієнт варіації збільшується до 0,819.

3. Математичні моделі, які описують вплив частоти обертання робочого шнека, кута його нахилу та ступеня відкриття перепускного вікна, на продуктивність Q (кг/с) та енергоємність E (кВт·год/т). Дослідження показали, що максимальна продуктивність досягається при значеннях: $x_1=70$ об/хв, $x_2=9$, $x_3=41$, коли продуктивність досягає 0,339 кг/с. У той же час мінімальна енергоємність $E=0,178$ кВтгод/т при $x_1=70$ об/хв, $x_2=7,54$, $x_3=90$.

4. Дотримання вимог охорони праці при роботі з доїльним обладнанням критично важливе для запобігання травмам та професійним захворюванням. Інструкції, розроблені згідно з українським та європейським законодавством, забезпечують безпечні умови експлуатації обладнання.

5. Техніко-економічна оцінка експериментального змішувача показала, що він має переваги в експлуатаційних витратах у порівнянні з базовим ЗКК-1,0. Річний економічний ефект від впровадження розробленого змішувача за 100% завантаження становить 27612,1 грн. У цьому випадку строк окупності складе всього 0,5 роки.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Єгоров, Б.В. Технологія виробництва комбікормів [Текст]: підруч. для вищ. навч. закладів/Б.В. Єгоров.–Одеса.: Друкарський дім, 2011.– 448 с.
2. Дудін В.Ю. Технологія виробництва і переробки продукції свинарства: навчальний посібник / М. Повод, О. Бондарська, В. Лихач, С. Жижка, В. Нечмілов та ін. – Київ : Науково-методичний центр ВФПО, 2021. – 360 с.
3. Повод М.Г, Дудін, В.Ю., Шпетний М.Б. Розробка основних засад щодо обґрунтованого визначення розмірів санітарно-захисних зон свиноферм: монографія, Суми, «Сумський національний аграрний університет» 2019. – 96 с., ISBN 978-617-593-059-5
4. Дудін В.Ю. Експериментальні дослідження малогабаритного подрібнювача соковитих кормів/ В.Ю. Дудін, О.С. Гаврильченко, П.С. Височин // Materials of the XIII International scientific and practical Conference Science and civilization – 2018, Volume 12, January 30 - February 7, 2018.: Sheffield. Science and education LTD – 41-45 p
5. Дудін В.Ю. Формування якості годівлі повнораціонними комбікормами / В.Ю. Дудін, О.С. Гаврильченко, Ю.І. Мудрак, П.І. Черниш //Materiály XIV Mezinárodní vědecko - praktická konference «Moderní vymoženosti vědy - 2018», Volume 8 : Praha. Publishing House «Education and Science» - S. 48-53.
6. Дудін В.Ю. Дослідження енергетичних характеристик процесу змішування сипких кормів/ В.Ю. Дудін, Я.О. Муха, О.Ю. Лук'яненко // Materials of the XIII International scientific and practical Conference Conduct of modern science - 2018 , November 30 - December 7, 2018. Construction and architecture. Agriculture. Modern information technology.: Sheffield. Science and education LTD – 41-45 p.
7. Дудін В.Ю. Дослідження процесу різання коренеплодів / В.Ю. Дудін, І.А. Бородавка//Materialy XV Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji,

«Strategiczne pytania światowej nauki - 2019» , Volume 10 Przemysł: Nauka i studia– 36-39 s.

8. Дудін В.Ю. Дослідження подрібнювача фуражного зерна сколюючої дії / В.Ю. Дудін, О.М. Антіпов // Materialy XV Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji, «Strategiczne pytania światowej nauki - 2019» , Volume 10 Przemysł: Nauka i studia -33-35 s.

9. Suhadi, W. Die Schecke als Arbeitsorgan in verarbeitungs - maschinen. / W.Suhadi. //-Maschinenbautemechnik –№5, 1967, – P. 41-56. (англ)

10. Oyama J., Ayaki K. Kagaki Kikai, 1956, №20, – P. 6.

11. Lacey. P.M. Development in the Thery of Particfl mixing. J. Appl. Chem. 1954, №4, – P. 257

12. Duschek K. Optimierung der Produktion in einem bolivianischen Ziegelwerk / Ziegelindustrie International. Wiesbaden: Dauerlag

13. Magnus, K. Schwingungen: Eine Einführung in die physikalischen Grundlagen und die theoretische Behandlung von Schwingungsproblemen [Text] / Kurt Magnus. - Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2008. – 74p.

14. Parkinson, A.G. Vibration and balancing of rotating continuous shafts [Text]/A.G. Parkinson, R.E.B. Bishop // Proc. IMechE, Part C: J. Mechanical Engineering Science. – 1961. – No.3. – P. 200-213.

15. Баранецька О.Р. Вібраційне змішування сумішей сипучих матеріалів [Текст] / О.Р. Баранецька // Машинознавство. – 2000. – № 3 (33). – С. 60–63.

16. Афтаназів, І.С. Вибір технології і обладнання для змішування сумішей сипучих матеріалів [Текст] / І.С.Афтаназів, О.Р.Баранецька, О.М. Сімчук// Машинознавство. – 1999. – № 5 (23). – С. 55–62.

17. Берник, М.П. Віброімпульсний привод нового вібраційного змішувача [Текст] / М.П. Берник, О.В. Цуркан, Л.Д. Величко // Вибрации в технике и технологиях. – 2001. – № 2(18). – С. 3–7.

18. Sarang O. Effects of powder cohesion and segregation on pharmaceutical mixing and granulation: dissertation doctor of philosophy: 05.2003/ O.Sarang // USA: New Jersey. – 2016. – P.1-8 (140).

19. Берник М.П., Цуркан О.В. Обґрунтування технологічних та конструктивних схем енергозберігаючих віброзмішувачів барабанного типу // Вибрації в техніці і технологіях. – 2001. – №1 (17). – С. 34–37.

20. Цуркан О.В., Величко Л.Д. Віброімпульсний привод нового вібраційного змішувача // Вибрації в техніці і технологіях. – 2001. – №2 (18). – С. 3–7.

21. Берник П.С., Берник М.П., Цуркан О.В. Енергозберігаючі змішувачі для приготування сипучих кормів // Техніка АПК. – 2003. – №8. – С. 16–18.

22. Регресійний аналіз [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://libfree.com/114811945_ekonomikaregresiyniy_analiz.html- Назва з екрану.

23. Рогатинський Р.М. Механіко-технологічні основи взаємодії шнекових робочих органів з сировиною сільськогосподарського виробництва: Дис.- докт. техн. наук: 05.20.01. - К., 1997.- 425 с.

24. Гевко І.Б., Гурик О.Я. Дослідження конструкторсько-технологічних параметрів зони перевантаження гвинтових транспортно-технологічних систем. Збірник наукових праць Національного аграрного університету "Механізація сільськогосподарського виробництва". - Том VII. - К.: Видавництво НАУ. - 2000. - с. 184-190.

25. Григор'єв А.М., Преображенський П.А. Комплексна механізація і автоматизація вантажорозвантажувальних і транспортних робіт в машинобудуванні і приладобудуванні. К.: Наукова думка, - 1967. - 116 с.

26. Радик Д.Л., Гурик О.Я. Дослідження енерговитрат шнекового змішувача. - Тернопіль: Вісник ТДТУ, 2001, Том. 6, №3 - С56-61.

27. Оришка Х.О., Гончаров В., Кравцова Г., Артюхов А.. Процес взаємодії з сипкими матеріалами у постачальному пристрої гравітаційно-роторного типу. Вісник ТДТУ, Т.6., №4., 2001. С. 88-95.

28. Хайліс Г.А., Коновалюк Д.М. Основи проектування і дослідження сільськогосподарських машин. Навч. посібник. -К.: НМК ВО, 1992. - 320 с.
29. Стадник І.Я. Науково-технічні основи дискретної дії на компоненти при перемішуванні : монографія / І.Я. Стадник. – Тернопіль : ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2015. – 240 с.
30. Strenk F. Mieszanieimieszalniki (Mixing and mixingequipment) / F.Strenk. – Warszawa : Wydawnictwa NaukowoTechniczne, 1971. – 367 p.
31. Стадник І.Я. Науково-технічні основи процесів та розробка обладнання для безлопатевого замішування тіста : дис ... д.т.н. : 05.18.12 / І.Я. Стадник. – Київ. – 2013. – 487 с.
32. Researching of the concentration distribution of soluble layers when mixed in the weight condition / I.Stadnyk, J.Pankiv, P.Navrylko, H.Karpyk // Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences. – 2019. – Vol. 13. – № 1. – P. 581–592. DOI: 10.5219/1129. 5
33. Корнієнко Я.М. Процеси переносу в дисперсних системах : навч. посіб. / Я.М. Корнієнко, Р.В. Сачок. – Київ, 2011. – 132 с. 10. Расслоение в псевдоожигеном слое [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://repetitora.com/rassloeniev-psevdoozhizhenom-sloe>.
34. Drobot V.I. Technological calculations in baking production / V.I. Drobot. – Condor, 2010. – 440 p.
35. Положення «Про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту» (Наказ Держгірпромнагляду від 24.03.2008 року № 53).
36. ДСТУ 4397: 2005. Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. – К.: Держспоживстандарт України, 2005. – 15 с.

ДОДАТКИ

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем

Обґрунтування конструкційних параметрів змішувача комбікорму

демонстраційний матеріал до дипломної роботи освітнього ступеня «Магістр»

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІз-І-23
Качалов Олексій Вячеславович

Керівник: к.т.н., доцент
Дудін Володимир Юрійович

Дніпро 2024

МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

2

Мета роботи. Зниження питомих витрат енергії в шнековому змішувачі за рахунок інтенсифікації взаємопроникнення інгредієнтів, що змішуються, удосконалення робочого органу та оптимізації його параметрів.

Завдання досліджень:

- обґрунтувати перспективну конструктивно-технологічну схему вертикального шнекового змішувача комбікормів зі зниженими питомими енерговитратами за збереження якості відповідно до зоотехнічних вимог;
- провести теоретичні дослідження технологічного процесу запропонованого вертикального шнекового змішувача з обґрунтуванням його основних конструктивно-технологічних та режимних параметрів;
- виконати експериментальні дослідження якості та енерговитрат технологічного процесу змішувача та оптимізації його конструктивно-технологічних та режимних параметрів;
- провести аналіз розробленого вертикального шнекового змішувача з точки зору охорони праці;
- виконати техніко-економічну оцінку оптимізованої конструкції вертикального шнекового змішувача.

Об'єкт дослідження - процес змішування сипких кормів в вертикальному шнековому змішувачі.

Предмет дослідження - залежності процесу сипких сипких кормів в порціонному вертикальному шнековому змішувачі.

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ

3

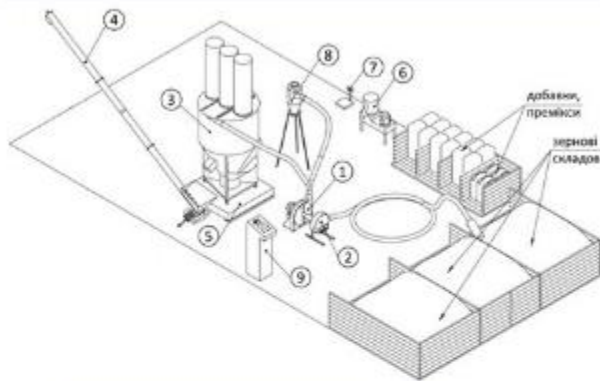


Рисунок 1 - Схема компонування відділення з приготування комбікорму в господарстві (ККУ-1, ТОВ «Дозамех Україна») : 1 – дробарка молоткова; 2 – сепаратор; 3 – основний змішувач; 4 – відвантажувальний шнековий транспортер; 5 – електронні або механічні ваги ; 6 – лопатевий змішувач для попереднього змішування; 7 – електронні або механічні ваги; 8 – циклон; 9 – пульт керування



Рисунок 2 – Класифікація змішувачів комбікормів

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ

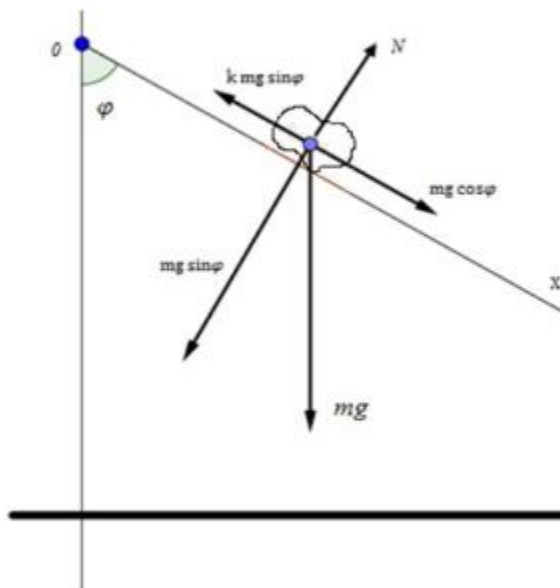
4

Таблиця 1 – Порівняльні характеристики різних типів змішувачів порційного типу

Конструктивна схема			
Тип	вертикальний лопатевий	стрічково-гвинтовий	вертикальний шнековий
Однорідність змішування, %	90...95	95...98	88...92
Питома енергоємність, кВт/т	3,6...5,5	2,25...3,25	0,75...1,15
Об'єм змішування, м	0,08...0,6	0,25...2,5	0,5...4,4
Призначення	приготування преміксів, БМВД	приготування преміксів, БМВД, комбікормів	приготування комбікормів

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

7



Рівняння руху з рис. 6

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = mg \cos \varphi - k mg \sin \varphi$$

де:

m - маса суміші на лопатях активатора, кг;
 g - прискорення вільного падіння, м/с²;
 k - коефіцієнт тертя.

час перебування частинки на похилій площині

$$x(t) = L \Rightarrow t^* = \frac{-v_0 + \sqrt{v_0^2 + 2g^* L}}{g^*}$$

Звідси швидкість, з якою частинка залишає лопать активатора

$$v_n = v(t^*) = v_0 + g^* t^*$$

Рисунок 6 – Частинка на похилій площині (виток шнека)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

8



Рисунок 7 – Загальний вигляд змішувача концентрованих кормів



а – механічний активатор (у розібраному стані); б – механічний активатор під час роботи; в – робоча камера змішувача із демонтованим активатором.

Рисунок 8 – Вид змішувального бункера змішувача концентрованих кормів

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

9

Продуктивність змішувача

$$Q(x_1, x_2, x_3) = 0,131 - 0,00467x_1 - 0,0094x_2 + 0,00054x_3 + 0,00056x_1x_2 + 0,000052x_1^2 - 0,000007x_3^2$$

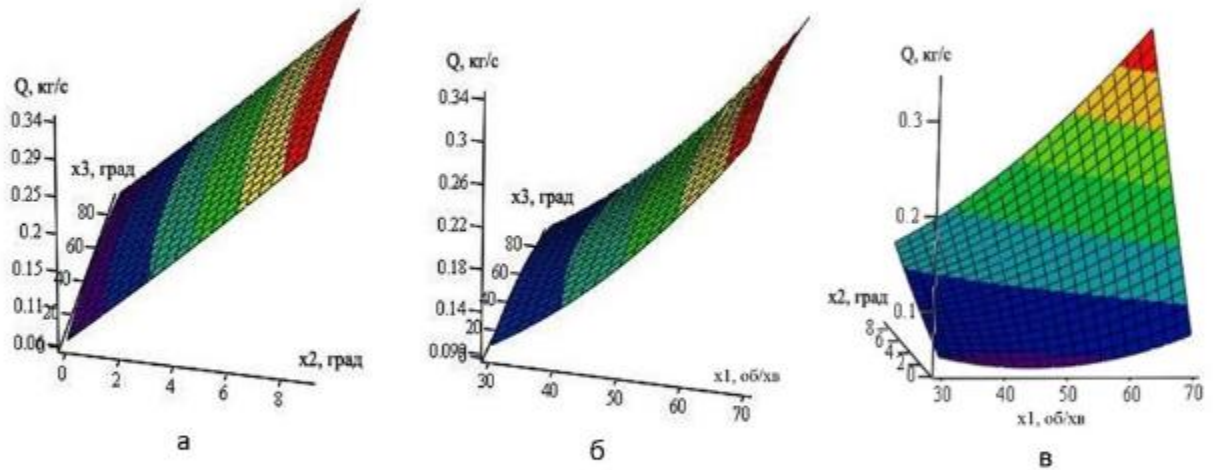


Рисунок 9 – Залежність продуктивності процесу Q (кг/с) від:

а - від кута нахилу шнека відносно вертикального положення x2 (град.) та кута відкриття заслонки x3 (град.)

б - від частоти обертання шнека x1 (об/хв) та кута відкриття заслонки x3 (град.)

в - частоти обертання шнека x1 (об/хв) та кута нахилу шнека відносно вертикального положення x2 (град.)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

10

Питома енергоємність змішувача

$$E(x_1, x_2, x_3) = 2,724 - 0,0412x_1 - 0,3204x_2 + 0,0026x_3 + 0,0018x_1x_2 - 0,0004x_2x_3 + 0,0002x_1^2 + 0,0153x_2^2$$

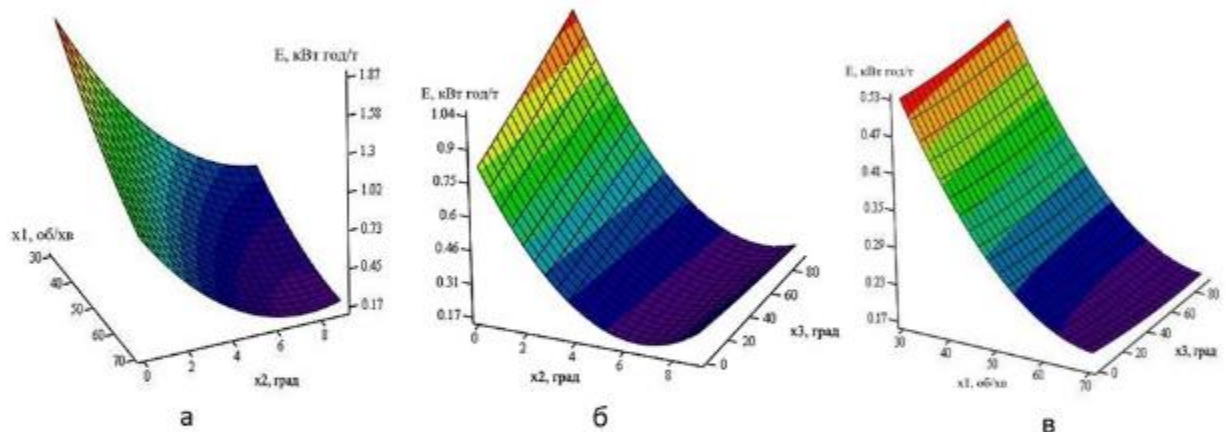


Рисунок 10 – Залежність енергоємності процесу E (кВт·год/т) від:

а - частоти обертання шнека x1 (об/хв) та кута нахилу шнека відносно вертикального положення x2 (град.)

б - від кута нахилу шнека відносно вертикального положення x2 (град.) та кута відкриття заслонки x3 (град.)

в - від частоти обертання шнека x1 (об/хв) та кута відкриття заслонки x3 (град.)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

11

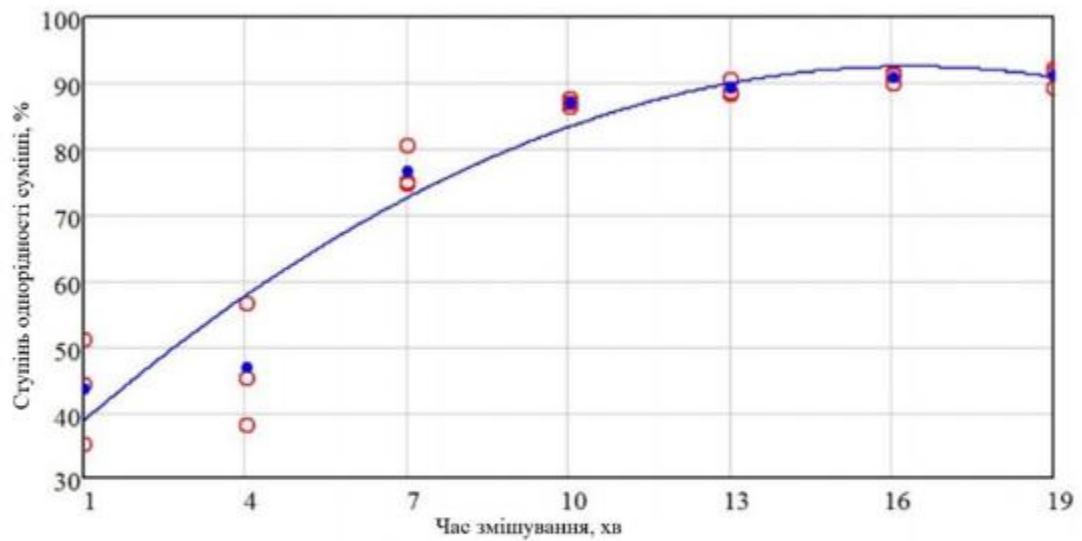


Рисунок 11 – Залежність показника коефіцієнта варіації суміші λ , %, від тривалості процесу змішування t , хв. при поєднанні факторів, що забезпечують максимальну продуктивність та мінімальну енергоємність процесу

ОХОРОНА ПРАЦІ

12

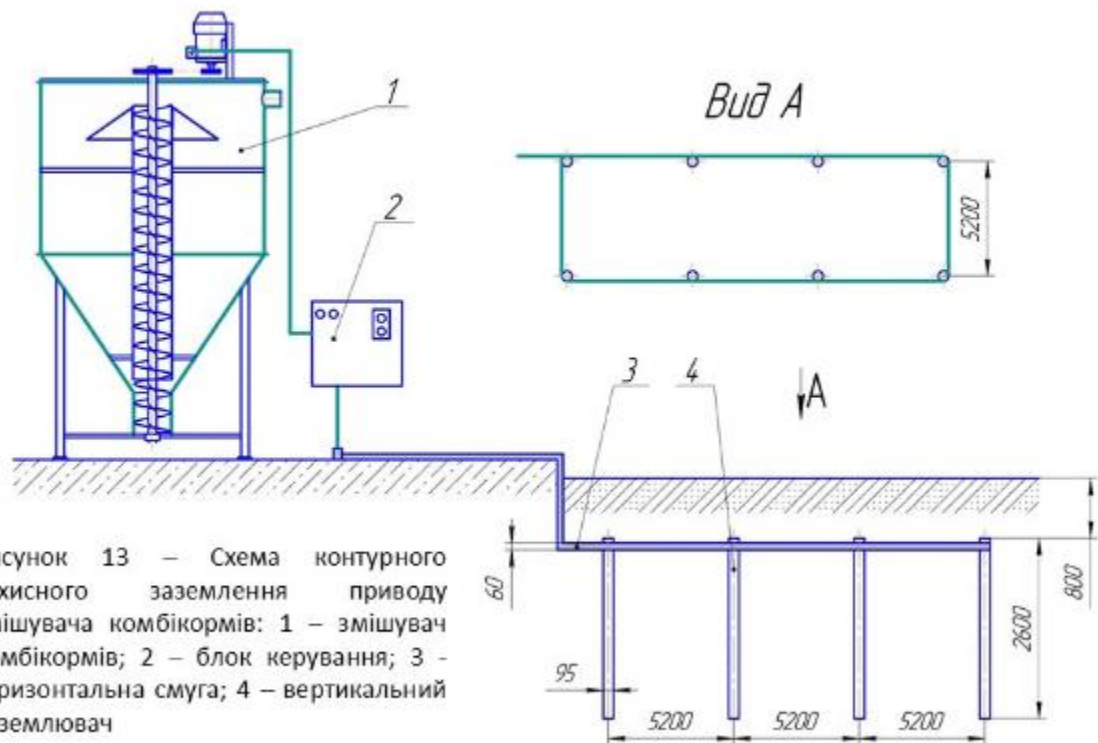


Рисунок 13 – Схема контурного захисного заземлення приводу змішувача комбікормів: 1 – змішувач комбікормів; 2 – блок керування; 3 – горизонтальна смуга; 4 – вертикальний заземлювач

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РОЗРОБЛЕНОГО ЗМІШУВАЧА

13

Показники	Варіанти		Проектований у % до базового
	ЗКК-1,0	розроблений змішувач	
Продуктивність, т/год.	1	1,2	120,0
Встановлена потужність, кВт	1,5	1,1	73,3
Обслуговуючий персонал, люд.	1	1	100,0
Балансова вартість, грн.	42000	42000	-
Інвестиції в удосконалення, грн.	-	14300	-
Питомі експлуатаційні витрати, грн./т	136,76	113,75	83,2
в т.ч.: заробітна платня	122,50	102,08	83,3
витрати на електроенергію	3,90	2,38	61,1
амортизаційні відрахування	5,75	7,71	134,0
витрати на ТО та ремонт	4,60	1,57	34,0
Максимальне річне навантаження, т	-	1200	-
Економія питомих експлуатаційних	-	23,01	-
Економія експлуатаційних витрат, грн.	-	27612,1	-
Строк окупності інвестицій, років	-	0,5	-

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

14

- Перспективним напрямом вдосконалення змішувачів є створення пристроїв, які поєднують у своїй конструкції гравітаційні змішувальні механізми та активатори механічного шнека. Поєднання двох принципів змішування дозволяє знизити енергоємність технологічного процесу за невеликих габаритних розмірів пристрою.
- Теоретично встановлено, що інтенсивність процесу змішування залежить від зони подачі корму в зерновий бункер, створеної механічним активатором. Наприклад, при розташуванні лівої межі зони подачі на відстані 0,02 м, а правої – 0,17 м, середній час одного оберту суміші становить 210 с, а коефіцієнт варіації – 0,466. Якщо межі змінити на 0,05 м і 0,15 м, час оберту скорочується до 72 с, проте коефіцієнт варіації збільшується до 0,819.
- Отримані емпіричні моделі, що встановлюють вплив частоти обертання робочого шнека (x_1), кута його нахилу відносно вертикалі вихідної горловини (x_2) і ступеня відкриття перепускного вікна (x_3), що знаходиться в середині кожуха шнека, на продуктивність Q , кг/с, і енергоємність E , кВт-год/т. Встановлено, що при $x_1 = 70$ об/хв, $x_2 = 9^\circ$, $x_3 = 41^\circ$ продуктивність досягає максимуму, рівного 0,339 кг/сек, а мінімальне значення енергоємності $E = 0,178$ кВт-год/т досягається при значеннях факторів $x_1 = 70$ об/хв, $x_2 = 7,54^\circ$, $x_3 = 90^\circ$.
- Дотримання вимог охорони праці при роботі з доільним обладнанням критично важливе для запобігання травмам та професійним захворюванням. Інструкції, розроблені згідно з українським та європейським законодавством, забезпечують безпечні умови експлуатації обладнання.
- Техніко-економічна оцінка експериментального змішувача показала, що він має переваги в експлуатаційних витратах у порівнянні з базовим ЗКК-1,0. Річний економічний ефект від впровадження розробленого змішувача за 100% завантаження становить 27612,1 грн. У цьому випадку строк окупності складе всього 0,5 роки.