

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

УДК 631.361:363

Кваліфікаційна робота на
правах рукопису

СТОЛЯР Олександр Олександрович

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ЗМІШУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ**

208 «Агроінженерія»

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело

(підпис)

(ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи
к.т.н., доц. Медведський О.В.

Житомир – 2024

АНОТАЦІЯ

Столяр О. О. **Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів змішування компонентів.** – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр зі спеціальності 208 – агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2024 р.

У кваліфікаційній роботі наведена оціночна характеристика експлуатаційних показників та конструкційних параметрів серійних змішувачів компонентів.

Проведені аналітичні дослідження вказали на закономірності процесу сумішоутворення, встановленні передумови для удосконалення конструкційно-технологічних параметрів змішувача компонентів. За результатами силового аналізу взаємодії стрічкового робочого органу із сумішкою визначені зусилля на процес перемішування.

Встановлено показники енергетичної ефективності та обґрунтовано конструкційно-технологічні параметри робочого органу змішувача.

Ключові слова: осьове переміщення, силова оцінка, зусилля приводу, енергоємність, стрічкова лопать

ANNOTATION

Stolyar O. O. **Justification of the structural and technological parameters of mixing components.** – Qualification work on manuscript rights.

Qualification work for a master's degree in specialty 208 – agroengineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2023

In the qualification work, the evaluation characteristics of operational indicators and design parameters of serial mixers of components are given.

The conducted analytical studies pointed to the regularities of the process of mixture formation, established prerequisites for improving the design and technological parameters of the mixer of components. Based on the results of the force analysis of the interaction of the belt working body with the mixture, the forces on the mixing process were determined.

The indicators of energy efficiency were established and the structural and technological parameters of the working body of the mixer were substantiated.

Key words: axial movement, force assessment, drive force, energy consumption, belt blade

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОЦІНКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗМІШУВАЧІВ КОМПОНЕНТІВ	7
1.1. Аналіз показників ефективності змішувачів компонентів	7
1.2. Обґрунтування конструкційно-технологічної схеми змішувача компонентів	10
1.3. Висновки до розділу 1	13
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ РОЗРОБЛЕНИМ ЗМІШУВАЧЕМ	14
2.1. Аналіз аналітичних форм встановлення якісних параметрів процесу змішування	14
2.2. Дослідження процесу змішування стрічковим гвинтовим робочим органом	17
2.3. Висновки до розділу 2	21
РОЗДІЛ 3. ВСТАНОВЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗРОБЛЕНОГО ЗМІШУВАЧА КОМПОНЕНТІВ	22
3.1. Визначення витрат енергії на процес змішування компонентів сумішки	22
3.2. Порівняльна оцінка розробленого змішувача із прототипом	25
3.3. Висновки до розділу 3	27
ВИСНОВКИ	29
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	31

ВСТУП

Актуальність теми. Отримання продукту заданої консистенції вимагає виконання надскладної технологічної операції яка полягає у змішуванні компонентів. Складність технологічного процесу в першу чергу визначається компонентами які необхідно перемішати між собою для отримання сумішки потрібної якості. Компоненти можуть відрізнятися як за фізико-механічними властивостями так і за розмірами часток. Зрозуміло, що найкраще будуть перемішуватися компоненти із схожими розмірами та технологічними параметрами і властивостями. Проте для отримання сумішок у галузі тваринництва перемішуванню підлягають компоненти відмінні як за фізико-механічними властивостями так і за розмірами. Розміри часток регламентовані вимогами до приготування компонентів раціону до згодовування. А кінцева якість суміші кормових компонентів визначається ступенем однорідності, який для різних видо-вікових груп тварин регламентований встановленими вимогами.

Дотримання встановлених вимог до якості кормової сумішки залежить від правильності вибору робочого органу. В залежності від вологості кінцевої суміші залежить форма робочого органу, яка найбільш якісно виконає технологічну операцію. Проте, незважаючи на достатність вивчення конструкційних особливостей робочих органів та параметрів їх використання, виникають питання щодо зниження енергоємності технологічного процесу та підвищення якості отриманої кормової суміші для годівлі тварин.

Тому, пошук оптимальних конструкційних параметрів та експлуатаційних режимів роботи робочих органів змішувачів компонентів залишається актуальним завданням. Вирішення вказаних питань сприятиме підвищенню ефективності галузі тваринництва за рахунок зниження витрат на кормоприготування та збільшення отримання кінцевого продукту.

Мета і задачі досліджень. Мета досліджень спрямована на підвищення ефективності змішувача компонентів кормів за рахунок оптимізації конструкційних параметрів змішувача.

Для досягнення вказаної мети дослідження потрібно вирішити наступні завдання:

- виконати аналіз показників ефективності змішувачів компонентів відмінних за фізико-механічними властивостями;
- обґрунтувати вибір конструкції робочого органу та технологічної схеми змішувача компонентів;
- встановити теоретичні передумови підвищення ефективності технологічного процесу змішування компонентів;
- визначити геометричні та кінематичні параметри робочого органу змішувача;
- встановити енергетичну ефективність технологічного процесу удосконаленим змішувачем компонентів;
- виконати порівняльну оцінку отриманих результатів із серійними технічними засобами

Об’єкт дослідження – процес приготування сумішки змішувачем із стрічково-гвинтовим робочим органом.

Предмет дослідження – закономірності впливу конструкційно-геометричних параметрів робочого органу змішувача на ефективність технологічного процесу.

Методи досліджень. Кваліфікаційна робота виконувалась із використання базових методів дослідження, таких як: аналітичний; експериментальний; розрахунковий.

Технологічний процес утворення суміші із компонентів описувався за допомогою використання відомих методів моделювання що включають елементи теоретичної механіки та теорії машин і механізмів, відомих положень механіки матеріалів та технології конструкційних металів, теорій суцільного середовища. Фізичне змодельовання допомагало переконатись в доцільності теоретичного викладу.

Для обробки результатів досліджень використовувалось програмне забезпечення Excel та елементи статистичної обробки отриманих результатів.

Апробація результатів роботи. Результати отримані при виконанні кваліфікаційної роботи пройшли належну апробацію на наукових конференціях, вміщенні у наступних матеріалах:

1. Столяр О. О. Розроблення конструкції змішувача компонентів. *Наукові читання–2024*: матеріали науково-практичної конференції. 20 травня 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. С. 103–106.

2. Столяр О. О. Оцінка технологічного процесу змішування компонентів. *Студентські читання–2024* : матеріали науково-практичної конференції. 31 жовтня 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 40–43.

3. Медведський О. В., Столяр О. О. Взаємодія робочого органу із компонентами сумішки у змішувачі. *Біоенергетичні системи* : матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції. 12-14 листопада 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. С. 5–8.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота у своєму складі має вступу, 3 розділи основної частини, загальні висновки, список використаних джерел. Текст кваліфікаційної роботи подано українською мовою на 32 сторінках машинопису, ілюстровано 2 таблицями та 10 рисунками.

РОЗДІЛ 1

ОЦІНКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗМІШУВАЧІВ КОМПОНЕНТІВ

1.1. Аналіз показників ефективності змішувачів компонентів

Для змішування компонентів сумішки використовуються різноманітні конструкції змішувачів, класифікаційні ознаки яких наведено на рис. 1.1.

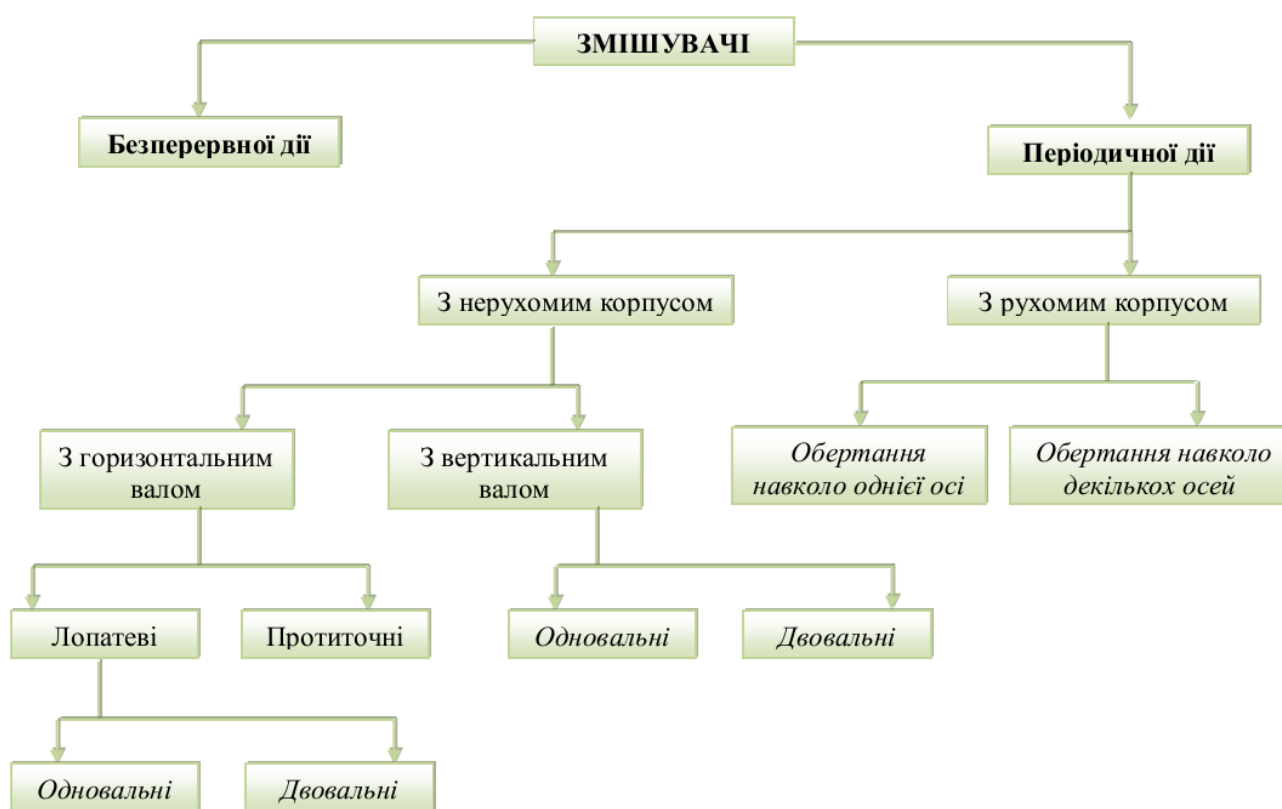


Рис. 1.1. Класифікаційна градація змішувачів компонентів [1, 2, 3, 4]

Відповідно до рис. 1.1. змішувачі компонентів поділяються на дві великі групи за способом реалізації технологічного процесу – періодичної та неперервної дії.

Змішувачі періодичної дії набули найбільшого поширення для приготування сумішок компонентів як у кормовиробництві так і у інших галузях народного господарства. Це можна пояснити досить високою

однорідністю отриманої сумішки. Експлуатаційні та технологічні характеристики змішувачів як періодичної так неперервної дії наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1.

Технічні дані змішувачів компонентів [5, 6, 7, 8]

Показник	Марка змішувача			
	ЗК-3	СКП/С2-1500	КЗ-200	СНД-2
Тип змішувача	періодичний			неперервний
Робочий об'єм, м ³	3,0	1,5	0,4	2,0
Тип робочого органу	одновалковий комбінований	двовалковий лопатевий	одновальний комбінований	двовалковий лопатевий
Продуктивність, т/год	6,0	5,0	2,0	25
Потужність на привод робочих органів, кВт	11,0	11,0	1,5	7,5
Однорідність змішування, %	93±1	95±3	92±2	80±3
Габаритні розміри, мм:				
довжина	3523	3330	1000	2800
ширина	1600	1600	700	1040
висота	4600	3384	1700	2020
Маса, кг	2300	1415	250	880

Основними питомими показниками для порівняльної оцінки технічних систем є питома енергоємність та питома матеріаломісткість [9, 10]. Перший показник дозволяє оцінити витрати енергії на отримання одиниці готової сумішки, а другий вказує на витрати матеріалу для отримання заданої конструкції та принципу дії змішувача.

Питома енергоємність визначається як відношення потужності на привод змішувача до його продуктивності [10, 11]:

$$E = \frac{N}{Q}, \quad (1.1)$$

де N – потужність, що витрачається на привод робочих органів змішувача, кВт;

Q – продуктивність змішувача, т/год.

Питома матеріаломісткість становить відношення маси змішувача до об'єму його робочої камери [10, 11]:

$$M = \frac{G}{V}, \quad (1.2)$$

де G – маса обладнання, т;

V – об'єм камери, м³.

Результати дослідження питомих показників наведені на рис. 1.2.

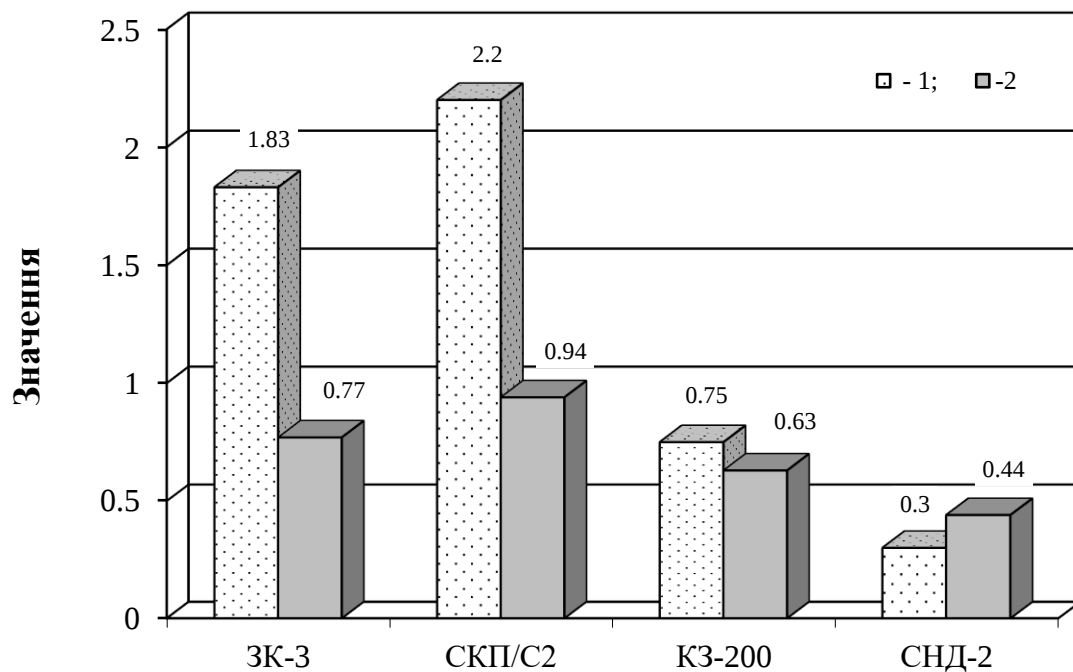


Рис. 1.2. Порівняльна оцінка змішувачів за показниками: 1 – питома енергоємність (E), кВт×год/т; 2 – питома матеріаломісткість (M), т/м³.

Змішувач періодичної дії СКП/С2-1500, відповідно до рис. 1.2, має найбільшу енергоємність як серед змішувачів періодичної дії так і порівняно із змішувачами неперервної дії. Вища на 20% енергоємність змішувача СКП/С2-1500 порівняно із змішувачем періодичної дії ЗК-3 пояснюється використанням двох лопатевих робочих органів [6] на відміну від гвинтового комбінованого робочого органу [5]. При цьому впливає висновок про більшу енергетичну ефективність гвинтових робочих органів порівняно із лопатевими.

Найменшу енергоємність, порівняно із дослідженими змішувачами ЗК-3, СКП/С2-1500 та КЗ-200 має змішувач неперервної дії СНД-2. Досягається це, в першу чергу, завдяки вищій продуктивності – на 19 т/год порівняно із ЗК-2, на 20 т/год порівняно із СКП/С2-1500, на 23 т/год порівняно із КЗ-200. При цьому потужність на привод робочих органів відрізняється несуттєво – лише на 3,5 кВт, тобто, лише на 32 %, а не у 4-5 разів як у випадку із продуктивністю.

Зважаючи на переваги змішувачів неперервної дії за продуктивністю та переваги гвинтових стрічкових робочих органів змішувачів періодичної дії, доцільно обрати за основу розробку змішувача неперервної дії із гвинтовим робочим органом у формі стрічки. При цьому стрічка має бути не суцільною, щоб створювати ефект перемішування лопатями. Саме такого типу конструкція змішувача запропонована у кваліфікаційній роботі [12] для отримання ступеня бакалавр. Але виникає потреба в обґрунтуванні конструкційних параметрів елементів робочого органу та енергетичних параметрів процесу сумішоутворення.

1.2. Обґрунтування конструкційно-технологічної схеми змішувача компонентів

Відомо, що найбільш поширеними робочими органами під час приготування кормових сумішок є лопатеві та шнекові робочі органи. Кожен із цих технічних виробів має свої переваги та недоліки.

Так, лопатеві робочі органи притаманні для змішувачів періодичної дії. Використання таких змішувачів найбільш поширене при отриманні важко сипких сумішей. Це стосується приготування кормових раціонів для свиней та великої рогатої худоби із процесом запарювання. При цьому використання пари потребує застосування парогенератора, яким, як правило, є котел. Проте використання котла для отримання пари особливо у період коли відсутня потреба в опаленні, на нашу думку є недоцільним. Використання парогенераторів із електричним живленням також вимагає додаткових витрат електроенергії. Лопатеві робочі органи не дозволяють отримати кормо суміш із високим ступенем однорідності. Проте, якість функціонування цілком прийнятна.

З технологічної точки зору, змішувачі періодичної дії мають значно меншу продуктивність порівняно із змішувачами неперервного процесу. Але варто зауважити, що якість змішування піддається коригуванню саме у змішувачах періодичної дії. Це пояснюється можливістю регулювати тривалість процесу змішування. Знаючи фізико-механічні характеристики компонентів, кінематичні характеристики робочих органів та геометричні параметри робочої камери змінюючи тривалість процесу можна отримати кормову суміш потрібної якості. Незважаючи на таку перевагу, різне співвідношення компонентів вимагатиме різну тривалість технологічного процесу. За умови неправильного встановлення складових, отримаємо перевитрати електроенергії, і як наслідок, значну енергоємність процесу та високу вартість одиниці отриманого продукту. Тому, змішувачі періодичної дії доцільно застосовувати у технологічних лініях приготування сумішок із незначним об'ємом з використанням компонентів котрі мають гарну сипкість.

Шнекові робочі органи притаманні змішувачам неперервної дії. За принципом дії, можна сказати, що це є звичайний гвинтовий транспортер в процесі транспортування матеріалу відбувається перемішування складових. Проте суцільна поверхня гвинтового робочого органу не дозволяє ефективно перемішуватись компонентам між собою. Перемішування відбувається тільки

за рахунок різних кутових прискорень компонентів, що викликано їх фізико-механічними властивостями.

Для покращення процесу перемішування компонентів використовують двошнекову систему змішувача. Така конструкція покращує процес сумішоутворення, але залишається недосконалою. У кваліфікаційній роботі автором розроблена конструкція змішувача компонентів із двома паралельними робочими органами (рис. 1.3).

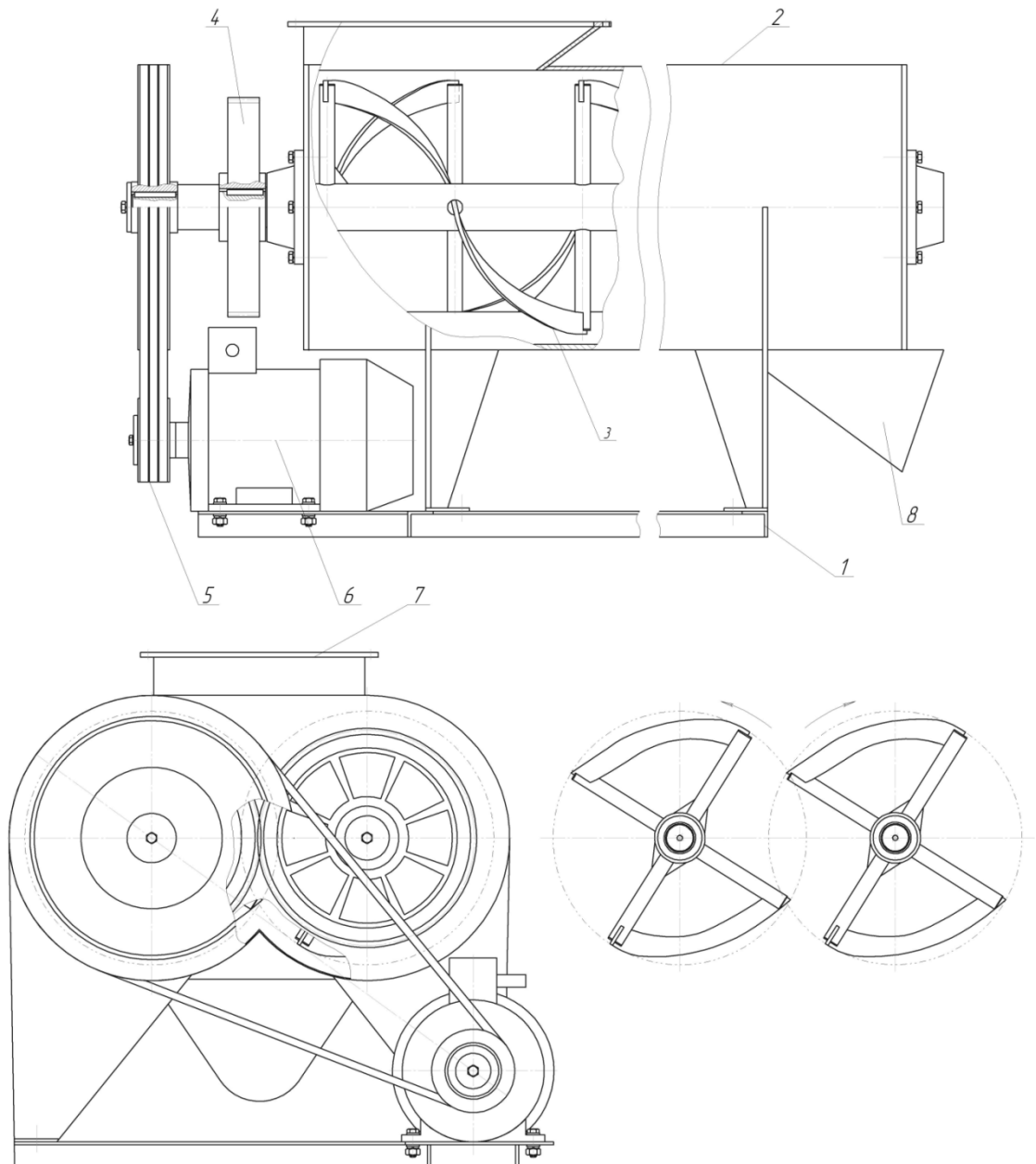


Рис. 1.3. Конструкція розробленого змішувача: 1 – основа; 2 – бокові стінки; 3 – гвинтовий змішувач; 4 – зубчасті колеса; 5 – клинопасовий привод; 6 – електропривод; 7 – вхідний отвір; 8 – вивантажувальний отвір. [12, 13]

Пропонована конструкція змішувача має ряд переваг перед серійними змішувачами. Зокрема, робочий орган виконано у вигляді стрічкового шнека. Це означає, що ми позбуваємося недоліків суцільного шнека. В процесі обертання робочого органу компоненти сумішки будуть рухатись вздовж осі валу завдяки гвинтовій формі поверхні стрічки. Оскільки елемент гвинта, який контактує із матеріалом, не є суцільним матеріалом не у всій кількості переміщується в поздовжньому напрямку. Частина матеріалу перекидається через стрічку і потрапляє у простір між наступним сусіднім гвинтом. Наступної миті, цей матеріал буде підхоплений стрічковим гвинтовим елементом, і процес повторюється.

1.3. Висновки до розділу 1

1. Першочергове завдання котре потребує вирішення – це вибір конструкційної схеми змішувача. Перш за все важливим є попередня оцінка всієї множини робочих органів технічних засобів для змішування компонентів. Це залежить від фізико-механічних властивостей компонентів у сумішці яку потрібно приготувати та технологічних потреб відповідно до умов виробництва.

2. Запропонована конструкція змішувача дозволяє підвищити ефективність процесу за рахунок інтенсифікації перемішування в процесі транспортування компонентів. Застосування розробки у виробничих умовах сприятиме отриманню якісних сумішок із високим ступенем рівномірності змішування.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ РОЗРОБЛЕНИМ ЗМІШУВАЧЕМ

2.1. Аналіз аналітичних форм встановлення якісних параметрів процесу змішування

Змішування компонентів є важливим технологічним процесом у приготуванні якісних сумішок. Це стосується приготування кормових сумішок в системі годівлі тварин та птиці, приготування різноманітних сумішок із відповідних компонентів в переробній галузі сільськогосподарської сировини, на комбікормових підприємствах, на підприємствах харчової промисловості та ін. Незалежно від сфери використання змішувачів компонентів важливим є забезпечення рівномірності їх розподілу в загальному об'ємі. [14, 15, 16]

При цьому одним із факторів, що впливає на вибір технологічного обладнання та типу робочого органу змішувача є кінцевий стан отриманої сумішки за показником вологості. Розрізняють сухі сумішки із вологістю до 20 %, зволожені сумішки із вологістю від 20 до 40 %, вологі сумішки із вологістю від 40 до 60 %, напіврідкі сумішки із вологістю від 60 до 80 %, рідкі сумішки із вологістю понад 80 %. З врахуванням кінцевого стану вибирається і конструкція технічної системи. Відповідно до поставленого завдання покращенню підлягає змішувач для приготування вологих або зволжених сумішок. [16]

Теоретичні передумови змішування першочергово визначають тривалість технологічного процесу, яка має три визначені ділянки (рис. 2.1).

На першій ділянці швидкість процесу майже не залежить від властивостей компонентів, змішування відбувається у макрооб'ємах та називається конвективним. [3, 16]

Друга ділянка відзначається сповільненням процесу змішування оскільки утворюються додаткові скупчення які необхідно включити в загальний процес

змішування, змішування відбувається у мікрооб'ємах та називається дифузійним. [3, 16]

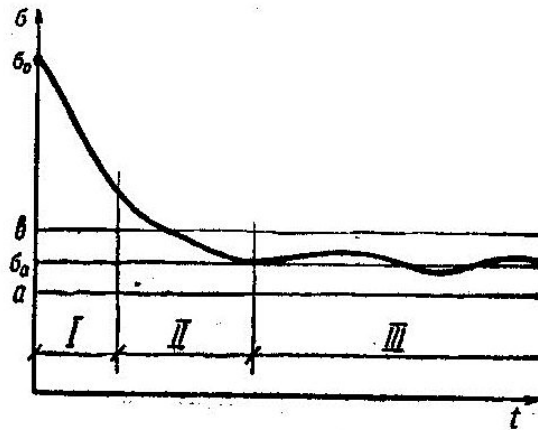


Рис. 2.1. Схема тривалості процесу отримання сумішки

Третя ділянка визначається протіканням процесу між паралельними прямими **ab**, в межах яких отримується максимально однорідна сумішка і основними в цьому просторі є вплив гравітаційних та інерційних сил. Такий процес має назву – сегрегація. [3, 16]

Відповідно до рис. 1, процес сумішоутворення завершується вкінці другої ділянки та на початку третьої. Продовжувати технологічну операцію змішування компонентів недоцільно. Це може призвести до зайвих витрат електроенергії без покращення якості сумішки, оскільки сумішка вже має належну якість. А за умови використання змішувача неперервної дії, штучне продовження тривалості змішування сприятиме збільшенню конструкційних розмірів технічної системи.

Якість сумішки оцінюється ступенем її однорідності за допомогою співвідношення теоретичного до фактичного середньоквадратичного відхилення при використанні одного з компонентів у якості контролю [3, 17]:

$$\theta = \frac{\sigma_m}{s}, \quad (2.1)$$

де σ_m – теоретично встановлене середньоквадратичне відхилення;

s – фактично встановлене середньоквадратичне відхилення.

Для визначення середньоквадратичних відхилень використовуються загальновідомі формули [4, 17]:

$$\sigma_m = \left[\frac{\sum_{i=1}^m (x_i - p)^2}{(m-1)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.2)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}{(m-1)}}, \quad (2.3)$$

де x_i – присутність компонента для контролю в i -ї вибірці;

p – наперед встановлена кількість компоненту для контролю;

$\bar{x}$ – середньоарифметичний показник компоненту для контролю для всієї множини вибірки;

m – кількість вибірок.

Отримані значення подаються у відсотках чи дробових частках. Максимальне наближення до 100% або максимальне наближення до 1,0 відзначає найвищу якість отриманої сумішки.

За умови використання змішувача неперервної дії процес змішування визначається завершеним технологічного процесу на деякій ділянці Δl довжиною протягом часу Δt (рис. 2.2). [3, 4]

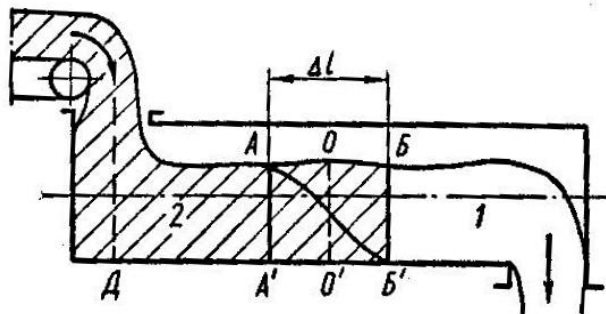


Рис. 2.2. Схематичний розподіл компонентів 1 та 2 у суміщі при неперервному змішуванні

Величина ділянки А-Б (рис. 2.2) залежить від конструкції та геометричних параметрів робочих органів, робочих режимів та фізико-механічних властивостей компонентів. З енергетичної точки зору більш прийнятним є мінімальне значення шляху який мають пройти компоненти корму до прийнятного змішування.

2.2. Дослідження процесу змішування стрічковим гвинтовим робочим органом

Під час обертання робочого органу з деяким фіксованим радіусом, компоненти здійснюють складні переміщення. В процесі переміщування компонентів витрачається зусилля, які спрямовують частинки сумішки в напрямку від площини контакту. При цьому виникають сили, спричинені опором середовища, що заповнює простір між гвинтами. Складовими рівнодіючої сили F (рис. 2.3) є її проекції – сила прикладена до осі обертання F_a та дотична (тангенційна) сила F_t . [17, 18]

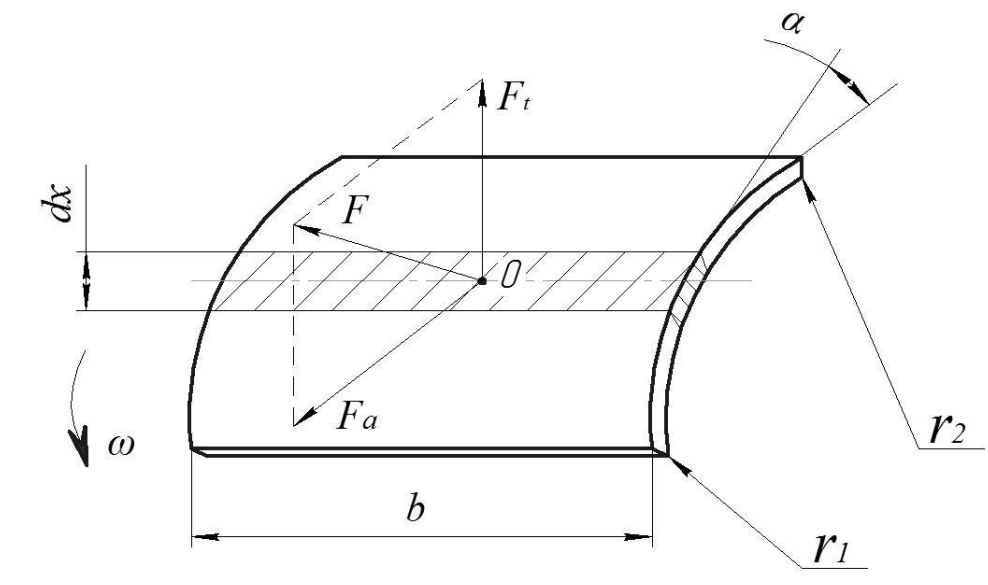


Рис. 2.3. Силевий аналіз частини стрічкового робочого органу

Розглянемо переміщення складових з обох боків стрічки. В такому випадку силу на переміщення за напрямом обертального руху можна знайти з врахуванням рівняння кількості руху [18] у вигляді:

$$F_a = l \cdot m \cdot (p_1 - p_2) + l \cdot m \cdot (\rho_1 \cdot v_1^2 - \rho_2 \cdot v_2^2), \quad (2.4)$$

де F_a – осьова сила, Н;

ρ_1, ρ_2 – об’ємна маса сумішки відповідно перед та за стрічкою, кг/м³;

p_1, p_2 – створюваний тиск подолання опору на перемішування відповідно перед та за стрічкою, Па;

m – крок гвинтової стрічки, м;

l – довжина частини стрічки задіяної у процесі переміщення, м;

v_1, v_2 – відповідно швидкість руху сумішки перед та після стрічки до напрямку обертання, м/с.

Якщо припустити, що $\rho_1 = \rho_2$ та $v_1 = v_2$, рівняння (2.4) набуде вигляду:

$$F_a = l \cdot m \cdot (p_2 - p_1). \quad (2.5)$$

На основі рівняння (2.5) впливає висновок про те, що осьова сила спрямована на приріст тиску (Δp).

Встановимо дотичну силу F_t з врахуванням рівняння імпульсу переміщення [17, 18], беручи до уваги рівняння (2.4):

$$F_t = l \cdot m \cdot v_1 \cdot (v_{1t} - v_{2t}), \quad (2.6)$$

де v_{1t}, v_{2t} – швидкості руху компонентів за напрямом дії дотичної сили, відповідно перед та після стрічки, м/с.

Залежність (2.6) не враховує розташування робочої частини стрічки у просторі відповідно до сумішки та напрямку обертання (кут α), а також не враховує фізико-механічні характеристики компонентів та сумішки в цілому. В

нашому випадку, для визначення зусиль котрі діють на елемент площадки стрічки, доцільно скористатись формулою Ньютона-Кармана [10, 17], отримаємо:

$$F_t = \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot \sin \alpha, \quad (2.7)$$

де ρ – густина середовища, кг/м³;

v – колова швидкість, м/с;

S – загальна площа контактної частини стрічки, м²;

α – кут встановлення стрічки, град.

В процесі руху стрічка за одиницю часу пересуває компоненти об'ємом $S \cdot v$. При цьому, кількість руху визначається як добуток об'ємної маси на колову швидкість $\rho \cdot v$. Враховуючи, що елементарну площу записують як $dS = b \cdot dx$, а колову швидкість $v = \omega \cdot x$ – рівняння (2.7) набуде виду:

$$dF_t = k \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot b \cdot \sin \alpha \cdot x^2 dx, \quad (2.8)$$

де k – коефіцієнт опору переміщення компонентів;

b – робоча ширина стрічки, м.

Проінтегруємо рівняння (2.8) з врахуванням радіусів згину передньої та задньої робочої частини стрічки в напрямку обертання:

$$F_t = k \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot b \cdot \sin \alpha \cdot \int_{r_1}^{r_2} x^2 dx, \quad (2.9)$$

отримаємо:

$$F_t = \frac{1}{3} k \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot b \cdot (r_2^3 - r_1^3) \cdot \sin \alpha, \quad (2.10)$$

де r_1, r_2 – відповідно радіуси передньої та задньої частини стрічки, м.

Сила опору F переміщення компонентів під час перемішування

визначається як сума квадратів осьової та дотичної сил:

$$F = \sqrt{F_a + F_t}. \quad (2.11)$$

Потужність на подолання сил опору перемішування визначається за формулою:

$$N = F \cdot \omega \cdot x_a \cdot n \cdot z, \quad (2.12)$$

де n – число задіяних елементів стрічки вздовж осі обертання, шт.;

z – число рядів лопаток, що одночасно взаємодіють із сумішкою під час перемішування, шт.;

x_a – точка прикладання сили F_t відносно осі обертання (рис. 2.3):

$$x_a = \frac{3}{4} \cdot \frac{r_2^4 - r_1^4}{r_2^3 - r_1^3} \quad (2.13)$$

У розрахунках використовується спрощений підхід, мета якого полягає у заміні значень радіусів для обертання на усереднений геометричний розмір витка стрічкової шнекової лопаті.

Кінематичні параметри розробленого робочого органу змішувача, за умови сталої кутової швидкості ($\omega = \text{const}$), можна встановити за допомогою виразу:

$$v = \omega \cdot r, \quad (2.14)$$

де r – величина радіусу навколо осі обертання елемента робочого органу, м;

ω – кутова швидкість робочого органу, рад/с.

За умови $r \rightarrow 0$, маємо $v \rightarrow 0$, тобто переміщення компонентів сумішки буде відсутнє біля валу робочого органу. Для уникнення цього розроблений змішувач має два робочих органи, кінцеві радіуси обертання яких перетинаються. При цьому не буде зони із нерухомими компонентами, а перехід від суцільного шнека до стрічкового знизить енергоємність процесу

змішування.

Запропоновані залежності описують силову оцінку розробленого робочого органу. Завдяки отриманим залежностям можна встановити витрати енергії залежно від кінематичних та геометричних параметрів змішувача компонентів.

2.3. Висновки до розділу 2

1. Отримання якісної сумішки залежить від багатьох факторів. В першу чергу це фізико-механічні та технологічні властивості компонентів сумішки. Саме на основі вказаних показників та консистенції готової сумішки обирається найбільш доцільний тип робочого органу.

2. Використання стрічкового гвинта дозволяє активізувати процес перемішування компонентів, а також прискорити отримання якісного кінцевого продукту. Присутність стрічкової лопаті забезпечує перехресні траєкторії частинок компонентів, що позитивно впливає на технологічний процес.

3. За результатами аналітичних досліджень отримані математичні вирази для встановлення потужності на привод запропонованого стрічково-лопатевого робочого органу змішувача неперервної дії залежно від геометричних та кінематичних параметрів.

РОЗДІЛ 3

ВСТАНОВЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗРОБЛЕНОГО ЗМІШУВАЧА КОМПОНЕНТІВ

3.1. Визначення витрат енергії на процес змішування компонентів сумішки

В попередньому розділі встановили залежності які дозволяють визначити потужність на привод робочих органів з врахуванням їх геометричних та кінематичних параметрів. Проте фактична потужність визначається з врахуванням втрат енергії у приводних механізмах та коефіцієнтів корисної дії електроприводу. Таким чином, необхідна потужність (N_3) зростає на коефіцієнт компенсації втрат:

$$N_3 = 1,15 \cdot N \cdot i, \quad (3.1)$$

де i – число змішуючих органів, шт.;

1,15 – ступінь зростання потужності на привод з врахуванням втрат енергії у приводних елементах [19].

З врахуванням прийнятих фізико-механічних властивостей сумішки компонентів для серії експериментів, енергоємність технологічного процесу змішування визначається за формулою, Вт×год/т [19]:

$$E_3 = \frac{N_3}{Q_3}, \quad (3.2)$$

де Q_3 – встановлена продуктивність змішувача, т/год:

В свою чергу продуктивність на змішуванні визначається [10]:

$$Q_3 = \frac{V_3 \cdot \rho_{ск} \cdot B_3}{t_{3м}}, \quad (3.3)$$

де V_3 – конструкційний об'єм змішувача, м³;

B_3 – коефіцієнт заповнення об'єму змішувача;

$\rho_{ск}$ – об'ємна маса сумішки, т/м³;

$t_{зм}$ – визначений період процесу отримання готової сумішки, год.

Під час проведення багатофакторного експерименту основною критеріальною оцінкою виступала енергоємність технологічного процесу змішування [20]. При цьому як за основні фактори було обрано інтенсивність обертання вала робочого органу, ширина стрічкового елемента шнека та величина заповнення об'єму змішувача (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Фактори з рівнями варіювання

Позначення	Фактор	Рівень варіювання		
		-1	0	+1
X1	Інтенсивність обертання, об/хв	100	200	300
X2	Ширина стрічкового робочого органу, м	0,03	0,05	0,07
X3	Величина заповнення об'єму, %	55	60	65

Обробка отриманих результатів досліджень за допомогою програмного забезпечення дозволило отримати рівняння регресії та графічні залежності взаємозв'язку кінематичних параметрів на енергоємність процесу змішування (рис. 3.1):

$$E_3 = 0,0000189 \cdot n^2 + 0,000689 \cdot n + 0,2549. \quad (3.4)$$

де n – інтенсивність обертання робочого органу, об/хв.

Рівняння регресії (3.1) є адекватним, оскільки взаємозв'язок розглянутих факторів має високий рівень коефіцієнта кореляції $R=0,977$.

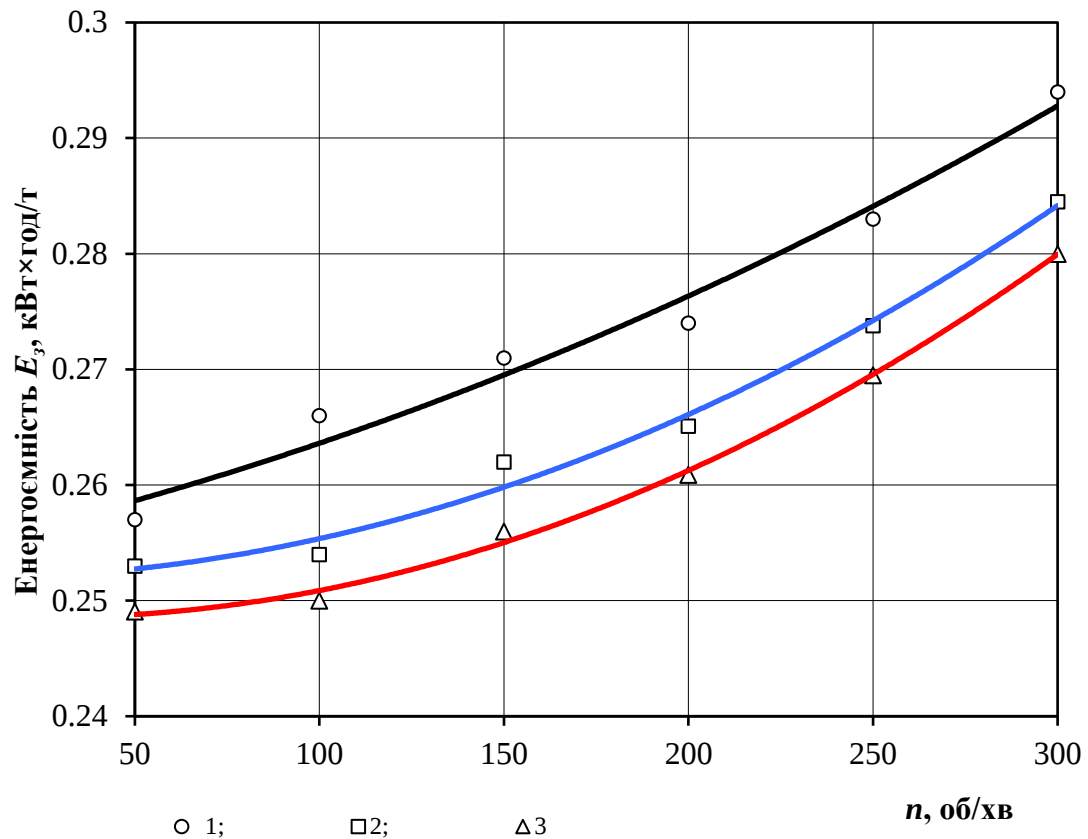


Рис. 3.1. Вплив інтенсивності обертання робочого органу на енергоємність процесу змішування при ступені заповнення робочого об'єму змішувача: 1 – 65 %; 2 – 60 %; 3 – 55 %

Енергоємність технологічного процесу змішування (рис. 3.1) збільшується зі зростанням інтенсивності обертання робочих органів та при збільшенні ступені заповнення робочого об'єму змішувача. Так, при збільшенні інтенсивності обертів від 50 до 300 об/хв, енергоємність зростає на 14,5 % для ступені заповнення об'єму між робочими органами на 65 %. При зменшенні ступені заповнення робочого об'єму змішувача до 55-50 % енергоємність зростає лише на 12-12,5 %. За умови робочої частоти обертання змішувальних механізмів як у змішувача СНД-2 на рівні 180 об/хв, енергоємність розробленого змішувача менша на 10,3 % при ступені заповненні на 65 %, менша на 14,1 % при ступені заповненні на 60 % та менша 16,3 % при ступені заповненні на 55 %.

3.2. Вплив геометричних та кінематичних параметрів робочого органу на ефективність змішувача компонентів

На характер протікання технологічного процесу змішування компонентів впливають також конструкційні параметри робочого органу. Зокрема, це стосується ширини гвинтової лопаті. За результатами досліджень отримані поверхні відгуку (рис. 3.2-3.4) та рівняння регресії:

$$E_z = 0,259 + 0,7598X_1 + 0,3889X_2 - 0,3789X_3 - 0,3581X_1X_2 + 0,0823X_1X_3 - 0,102X_2X_3 + 0,103X_1^2 + 0,173X_2^2 + 0,8533X_3^2. \quad (3.5)$$

де X_1 – інтенсивність обертання робочого органу, об/хв.;

X_2 – ширина стрічки гвинтової лопаті, м;

X_3 – ступінь заповнення робочого об'єму змішувача, %.

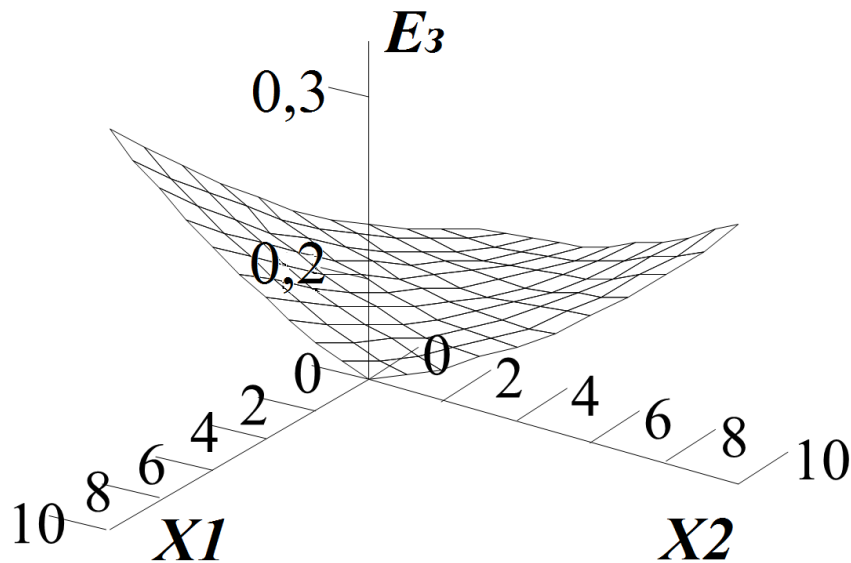


Рис. 3.2. Залежність енергоємності процесу змішування від інтенсивності обертання робочого органу (X_1) та ширини стрічки гвинтової лопаті (X_2)

Відповідно до отриманої поверхні відгуку (рис. 3.2), зі збільшенням ширини стрічкового елементу лопаті робочого органу змішувача енергоємність технологічного процесу збільшується. Зростанню енергоємності сприяє

збільшення інтенсивності обертання робочого органу. З врахуванням розрахункової частоти обертання робочого органу на рівні 180 об/хв та відповідної енергоємності (див. рис. 3.1) оптимальна ширина стрічки буде знаходитись в межах 0 та -1 на двомірній площині, що відповідає величині 0,03-0,05 м.

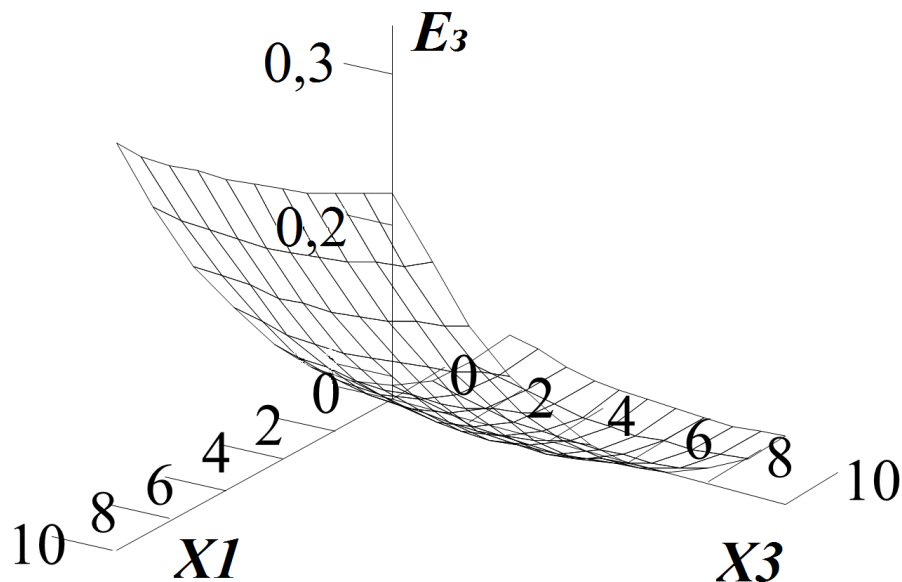


Рис. 3.3. Залежність енергоємності процесу змішування від інтенсивності обертання робочого органу (X_1) та ступеня заповнення робочого об'єму (X_3)

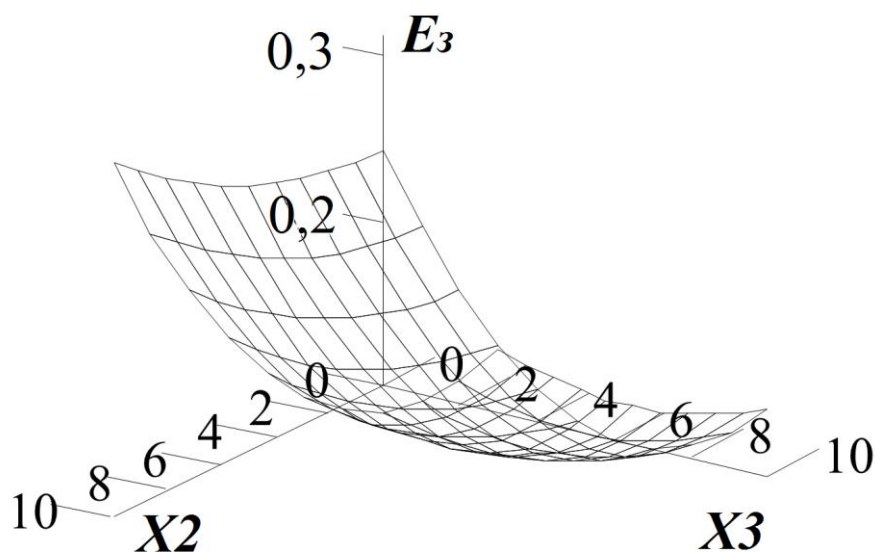


Рис. 3.4. Залежність енергоємності процесу змішування від ширини стрічки гвинтової лопаті (X_2) та ступеня заповнення робочого об'єму (X_3)

Зі збільшенням ступені наповнення об'єму змішувача компонентами сумішки (рис. 3.3), енергоємність технологічного процесу зростає менш інтенсивно порівняно із інтенсивністю обертання робочого органу. Це впливає, також, із аналізу рівняння регресії (3.5), де добуток вказаних факторів має найменшу значущість. При цьому за умови прийнятих оптимальних меж ширини стрічки оптимальне значення ступеня заповнення буде знаходитись в межах від 0 до +0,5 на двомірній площині, що відповідає величині заповнення 60-62,5 %.

Сукупний вплив ширини стрічки гвинтової лопаті та ступеня заповнення робочого об'єму змішувача (рис. 3.4) менш виразний за вплив поєднання таких факторів як інтенсивність обертання робочих органів та ступінь заповнення робочого простору. При цьому за умови прийнятої інтенсивності обертання робочого органу оптимальне значення ступеня заповнення буде знаходитись в межах від 1 до -0,5 на двомірній площині, що відповідає величині заповнення в діапазоні 57,5-65 %.

При усуненні менш значущих поєднань факторів, рівняння регресії (3.5) набуде спрощеного вигляду:

$$E_3 = 0,259 + 0,7598X_1 + 0,3889X_2 - 0,3789X_3. \quad (3.6)$$

Рівняння регресії (3.6) встановлює взаємозв'язок між трьома факторами та є адекватним.

3.3. Висновки до розділу 3

1. Встановлено вплив основних факторів – інтенсивності обертання робочого органу, ступінь заповнення робочого простору та ширина стрічки гвинтової лопаті на енергоємність процесу отримання сумішки із заданих компонентів розробленим змішувачем.

2. За результатами досліджень отримано рівняння регресії яке встановлює взаємозв'язок із досліджуваними факторами. Встановлено, що на енергоємність технологічного процесу найбільший вплив має інтенсивність обертання робочих органів, та майже однаковий вплив мають ступінь заповнення робочого об'єму змішувача та ширина стрічки гвинтової лопаті в діапазоні досліджуваних величин.

3. Встановлено раціональні значення кінематичних, конструкційних та технологічних параметрів розробленого змішувача компонентів. Так за умови частоти обертання робочих органів на рівні 180 об/хв, найменша енергоємність спостерігається при ступені заповнення робочого об'єму змішувача на 60-62 %, а ширина стрічки гвинтової лопаті має бути в межах 30-50 мм (конструкційно прийнято 40 мм).

4. Використання в якості робочого елемента лопатево-стрічкового гвинтового робочого органу у розробленому змішувачі дозволяє знизити енергоємність технологічного процесу сумішоутворення, порівняно із серійним змішувачем СНД-2, на 14-15 % – становить 0,260 кВт×год/т. Незважаючи на збільшення на 200 кг ваги розробленого змішувача, завдяки вищій на 15,25 т/год продуктивності питома матеріаломісткість на 18,7 % менша ніж у змішувача СНД-2.

ВИСНОВКИ

1. Змішувачі компонентів відрізняються способом реалізації технологічного процесу та конструкцією робочих органів. Оцінка змішувачів вказала що за питомими показниками енергоємності отримання готової сумішки найбільш прийнятні змішувачі неперервного технологічного процесу завдяки вищій продуктивності, порівняно із змішувачами періодичної дії. Проте за показником однорідності отриманої сумішки кращі показники мають змішувачі періодичної дії. У кваліфікаційній роботі запропонована конструкція робочого органу яка увібрала позитивні сторони як змішувачів періодичної дії так і змішувачів неперервної дії.

2. Використання розробленого стрічково-лопатевого гвинтового робочого органу дозволяє активізувати процес перемішування компонентів завдяки поєднанню позитивних ознак лопатевого (вища продуктивність) та стрічково-гвинтового (вища якість перемішування) робочих органів. Одночасна робота двох стрічково-лопатевих робочих органів забезпечує перехресні траєкторії руху частинок компонентів, що позитивно впливає на якість технологічного процесу.

3. За результатами аналітичних досліджень отримані математичні вирази для встановлення потужності на привод запропонованого стрічково-лопатевого робочого органу змішувача неперервної дії залежно від геометричних та кінематичних параметрів.

4. Встановлено що ефективність сумішоутворення впливають наступні фактори: інтенсивності обертання робочого органу, ступінь заповнення робочого простору в об'ємі змішувача та ширина стрічки гвинтової лопаті. За результатами досліджень отримано рівняння регресії яке встановлює взаємозв'язок із досліджуваними факторами.

5. Встановлено, що на енергоємність технологічного процесу найбільший вплив має інтенсивність обертання робочих органів, та майже однаковий вплив мають ступінь заповнення робочого об'єму змішувача та ширина стрічки гвинтової лопаті в діапазоні досліджуваних величин. Так, при збільшенні

інтенсивності обертів від 50 до 300 об/хв, енергоємність зростає на 10,5-16,3 % при зміні ступеня заповнення об'єму між робочими органами на 55-65 %. Більшому значенню зростання енергоємності відповідає менше значення ступені заповнення робочого об'єму. За умови незмінності інтенсивності обертання при збільшенні ступені заповнення робочого об'єму від 55 до 65 % енергоємність зростає лише на 3-5 %.

6. Встановлено раціональні значення кінематичних, конструкційних та технологічних параметрів розробленого змішувача компонентів. Частота обертання робочих органів становить 180 об/хв, ступінь заповнення робочого об'єму змішувача в межах 60-62 %, ширина стрічки гвинтової лопаті має раціональні межі 30-50 мм, довжина робочого органу становить 2800 мм, а діаметр 400 мм.

7. Встановлено, що використання лопатево-стрічкового гвинтового робочого органу розробленого змішувача дозволяє знизити енергоємність технологічного процесу сумішоутворення на 14-15 % (0,260-0,263 кВт×год/т), порівняно із серійним змішувачем СНД-2. Це досягається завдяки вищій на 15,25 т/год продуктивності та меншій на 3,5 кВт потужності на привод робочих органів при збільшенні на 22,5 % маси розробленого змішувача.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хомик Н. І., Довбуш А. Д. Машини та обладнання для тваринництва: курс лекцій. Ч. 1. Тернопіль: Видавництво ТНТУ, 2013. 224 с.
2. Посібник-практикум: машини та обладнання для тваринництва / І. І. Ревенко та ін. К.:Кондор, 2011. 396 с.
3. Ревенко І. І., Брагінець М. В., Ребенко В. І. Машини та обладнання для тваринництва : підручник. К. : Кондор, 2012. 713 с.
4. Ревенко І. І., Хмельовський В. С., Заболотько О. О. Машини і обладнання для тваринництва: Електронний підручник. Київ, ДУ «Науково-методичний центр вищої та фахової передвищої освіти», 2019. URL: <http://rodak.if.ua/mot/index.htm>.
5. Змішувач корму : веб-сайт. URL : <https://artmash.ua/product/cmesitel-korma-3-kub-m>.
6. Змішувач кормів : веб-сайт. URL : <https://ssvga.net.ua/ua/p1086924142-smesitel-kombikormov.html>.
7. Кормозмішувач КЗ-200Л : веб-сайт. URL : <https://mpsr.com.ua/ua/p2272535994-kormosmesitel-200l-shnekovym.html>.
8. Змішувач неперервної дії : веб-сайт. URL : <https://www.ukrsintgas.net/snd/>
9. Черновол М.І., Свірень М.О., Кісільов Р.В. Приготування кормових сумішей комбінованим змішувачем. *Вісник аграрної науки*. 2018. №2. С. 54–59.
10. Шабельник Б. П., Троянов М. М. Теорія та розрахунок машин для тваринництва. Х.: ХДТУСГ, 2012. 216 с.
11. Кісільов Р. В., Лузан П. Г., Богатирьов Д. В., Нестеренко О. В. Дослідження процесу сумішоутворення лопатевим змішувачем для ВРХ. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2022. Вип. 52. С. 66–72.
12. Столяр О. О. Удосконалення змішувача компонентів раціону : кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр зі спеціальності 208 – агроінженерія. Житомир: Поліський національний університет, 2023. 36 с.

13. Столяр О. О. Розроблення конструкції змішувача компонентів. *Наукові читання–2024: матеріали науково-практичної конференції*. 20 травня 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. С. 103–106.
14. Якість змішування кормів – запорука зростання продуктивності тварин / В. А. Шацький та ін. *Праці Таврійського державного агротехнологічного ун-ту*. Мелітополь: ТДАТУ, 2013. Вип. 1. Т. 3. С. 43–50.
15. Хмельовський В. С. Оцінка рівномірності змішування кормів. *Зб. тез доповідей XII Міжнар. наук.-практ. конф. Обухівські читання*, 21 березня 2017 р. НУБІП України. К., 2017. С. 77–78.
16. Столяр О. О. Оцінка технологічного процесу змішування компонентів. *Студентські читання–2024* : матеріали науково-практичної конференції. 31 жовтня 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 40–43.
17. Шацький В. В. Математичне моделювання динамічної щільності та якості кормової сумішки для тварин *Наук. вісник Таврійського держ. агротехнолог. ун-ту*. 2012. Вип. 2. Т. 2. С. 3–19.
18. Медведський О. В., Столяр О. О. Взаємодія робочого органу із компонентами сумішки у змішувачі. *Біоенергетичні системи* : матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції. 12-14 листопада 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. С. 5–8.
19. Борозенець Г. М., Павлов В. М., Семак І. В. Деталі машин : навчальний посібник. К.: Видавничий дім «Кондор», 2021. 220 с.
20. Водяний Г. П. Математична обробка дослідних даних у процесах обробки матеріалів. К.: Вища школа, 2002. 458 с.