ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем

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

Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів змішувача комбікорму

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІ-3-24
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

_____ Антіпов Артур Євгенович

Керівник: _____ Дудін Володимир Юрійович

Рецензент: _____ Садченко Роман Вікторович

Дніпро 2025

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)
«24» жовтня 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Антіпову Артуру Євгеновичу.
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів змішувача комбікорму
керівник роботи: Дудін Володимир Юрійович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від
« 24 » жовтня 2025 року № 3182

2. Строк подання студентом роботи 12.12.2025 р.

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

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз стану питання і завдання дослідження. 2. Теоретичне обґрунтування основних параметрів вібраційного змішувача. 3. Експериментальні дослідження вібраційного 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 (3 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 Нормоконтроль	Дудін В.Ю., доцент Івлєв В.В., доцент		

7. Дата видачі завдання: 24.10.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний (оглядовий)	до 01.10.2025 р.	
2	Теоретичний	до 20.10.2025 р.	
3	Експериментальний	до 09.11.2025 р.	
4	Охорона праці	до 19.11.2025 р.	
5	Економічний	до 26.11.2025 р.	
6	Демонстраційна частина	до 30.11.2025 р.	

Студент _____ Антіпов А.Є.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Дудін В.Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали)

№ п/п	формат	Позначення	Найменування	Кількість аркушів	Номер аркуша	Примітка
			Текстові документи			
1	А4		Пояснювальна записка	79		
			Демонстраційні			
2	А4		Мета і задачі	3	2,3,4	
3	А4		Теоретичні дослідження	2	5,6,7	
4	А4		Експериментальні	2	8,9,1	
5	А4		Охорона праці	1	11	
6	А4		Економічна частина	1	12	
7	А4		Висновки	1	13	

Зм	Арк.	№ докум.	Підп.	Да	46ДР072.000.000РД		
Розроби		Антіпов			Відомість дипломної роботи	літе	арку 4 / арк 79
Перевір		Дудін					
Т. контр						МгАІ-3-24, ДДАЕУ	
Н.		Івлєв					
Затверд		Дудін					

Антіпов А.Є. Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів змішувача комбікорму /Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2025.

У дипломній роботі проведено обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів змішувача сипких комбікормів з комбінованим стрічковим шнеком. Виконано аналіз існуючих технічних рішень та визначено основні недоліки традиційних горизонтальних змішувачів, зокрема наявність застійних зон та підвищене енергоспоживання. На основі теоретичних досліджень побудовано математичну модель процесу змішування, яка дозволила визначити раціональні параметри гвинтових елементів та режими роботи.

Проведено комплекс експериментальних досліджень, результати яких показали, що вдосконалена конструкція забезпечує однорідність суміші до 97,8 %, а мінімальні енерговитрати - 2,25 кВт·год/цикл при частоті обертання 40,5 хв$^{-1}$. Встановлено оптимальний час змішування - 2,9–3,56 хв залежно від частки дрібнодисперсного компоненту. Техніко-економічна оцінка підтвердила доцільність впровадження змішувача: зниження питомих витрат на 11 %, річний економічний ефект 9238,7 грн, строк окупності - 1,3 року.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації обладнання комбікормових ліній у тваринницьких господарствах різних типів.

Ключові слова: змішувач комбікормів; стрічковий шнек; горизонтальний змішувач; однорідність суміші; сипкі корми; комбінований шнек; режимні параметри; енергоефективність; потужність приводу; питома енергоємність; оптимізація конструкції; техніко-економічна оцінка.

ЗМІСТ

	Вступ	8
1	АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ	10
	1.1 Загальні поняття про сипкі кормові суміші	10
	1.2 Критерії оцінки якості змішування	11
	1.3 Аналіз існуючих конструкцій змішувачів комбікормів	16
	1.4 Висновки	23
2	ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗМІШУВАЧА	25
	2.1 Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів	25
	2.2 Обґрунтування зміни конструктивних параметрів стрічкового шнека	31
	2.3 Теоретичні дослідження взаємодії поверхні гвинта з матеріалом	34
	2.4 Дослідження впливу параметрів змішувача на енергетичні показники	37
	2.5 Висновки	42
3	ЕКСПЕРИМНЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІШУВАЧА	44
	3.1 Програма експериментальних досліджень	44
	3.2 Об’єкти експериментальних досліджень	45
	3.3 Методика проведення експерименту	46
	3.4 Аналіз результатів досліджень	48
	3.5 Висновки	56
4	ОХОРОНА ПРАЦІ	57
	4.1 Загальні вимоги охорони праці на комбікормових підприємствах	57
	4.2 Небезпечні та шкідливі виробничі фактори	

на комбікормових підприємствах 58

4.3 Оцінка виробничих ризиків при експлуатації

лінії змішування комбікормів 62

4.4 Висновки 61

5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

ЗМІШУВАЧА КОМБІКОРМІВ 62

5.1 Вихідні дані 62

5.2 Розрахунок показників економічної ефективності 62

5.3 Висновки 63

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 64

БІБЛІОГРАФІЯ 66

Вступ

В умовах інтенсифікації тваринництва важливим завданням сучасного сільськогосподарського виробництва є забезпечення тварин повноцінними кормами, що відповідають їхнім фізіологічним потребам. Одним із ключових етапів у технологічному процесі приготування комбікормів є змішування, від якості якого залежать рівномірність розподілу поживних речовин, стабільність складу кормової суміші та, зрештою, продуктивність тварин. Саме тому підвищення ефективності змішувального обладнання має суттєве значення як у технологічному, так і в економічному аспектах.

На сучасному етапі розвитку агропромислового комплексу України використовуються різні типи змішувачів - шнекові, лопатеві, барабанні, планетарні тощо. Проте більшість з них характеризується недостатньою інтенсивністю процесу змішування, значними енергетичними витратами та нерівномірністю структури суміші. Тому актуальним є створення нових конструкцій змішувачів або вдосконалення існуючих, що забезпечують підвищення ефективності процесу при мінімальних витратах енергії.

Вибір раціональних конструкційно-технологічних параметрів змішувача є складним завданням, що потребує теоретичного обґрунтування з урахуванням фізико-механічних властивостей компонентів комбікорму, динаміки руху часток у робочій камері та особливостей конструкції робочих органів. Застосування сучасних методів розрахунку та моделювання процесів змішування дозволяє підвищити точність визначення оптимальних параметрів обладнання та скоротити обсяг експериментальних досліджень.

Метою магістерської роботи є обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів змішувача комбікорму, що забезпечують інтенсивне й рівномірне перемішування компонентів при мінімальних енергетичних витратах.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких завдань:

- Провести аналіз існуючих конструкцій змішувачів комбікормів і визначити їхні переваги та недоліки.
- Обґрунтувати вибір типу змішувача та принципу його роботи.
- Розробити теоретичну модель процесу змішування сипких компонентів.
- Визначити оптимальні конструкційно-технологічні параметри змішувача.
- Розробити програму та методику експериментальних досліджень і провести аналіз отриманих результатів.
- Розглянути питання охорони праці під час експлуатації змішувального обладнання.
- Виконати оцінку енергетичної ефективності та економічну доцільність застосування запропонованої конструкції.

У роботі застосовано комплекс методів дослідження: аналітичний, експериментальний, графо-аналітичний, а також методи математичного моделювання.

Отримані результати мають практичне значення для проектування й удосконалення змішувачів комбікормів, а також можуть бути використані при модернізації існуючих технологічних ліній на підприємствах кормової промисловості та фермах різних типів.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ

1.1 Загальні поняття про сипкі кормові суміші

Комбікорми - це спеціально підготовлені суміші подрібнених компонентів (зернових, білкових, мінеральних, вітамінних та інших добавок), призначені для згодовування тваринам у збалансованому вигляді. Залежно від складу, способу приготування та призначення комбікорми поділяються на повнораціонні, концентровані, білково-вітамінно-мінеральні добавки (БВМД) та премікси.

Сипучі кормові суміші є основною формою комбікормів, що найчастіше використовується у тваринництві. Вони забезпечують рівномірний розподіл поживних речовин і зручність у транспортуванні, зберіганні та роздаванні. Основними фізико-механічними характеристиками сипких кормових сумішей є насипна маса, крупність часток, вологість, кут природного укосу, текучість, зчеплення часток та схильність до розшарування.

Якість змішування визначає рівномірність розподілу окремих компонентів у загальній масі суміші. Цей показник має суттєвий вплив на ефективність годівлі тварин, адже нерівномірність призводить до надлишку або дефіциту окремих поживних речовин у раціоні, що негативно позначається на приростві живої маси, продуктивності та здоров’ї поголів’я.

До сипучих кормових сумішей висуваються такі основні вимоги:

Рівномірність складу - відхилення концентрації компонентів у зразках не повинно перевищувати 5–10 %.

Оптимальна вологість (12–14 %) - забезпечує стабільність при зберіганні, запобігає злежуванню та мікробіологічному псуванню.

Однорідність фракційного складу - зменшує ймовірність розшарування під час транспортування та роздавання.

Хороша сипкість і текучість - важлива для ефективної роботи транспортних і змішувальних механізмів.

Відсутність грудок, пилу та сторонніх домішок, які погіршують якість суміші та можуть вивести обладнання з ладу.

Стійкість до розшарування під дією вібрацій і механічних переміщень.

Під час приготування сипких комбікормів важливо враховувати властивості кожного компонента, адже різниця в густині, розмірі та формі часток зумовлює складність процесу змішування. Для досягнення високої однорідності необхідно застосовувати раціональні конструкції змішувачів, що забезпечують інтенсивне переміщення частинок у всьому об’ємі робочої камери.

Таким чином, ефективність процесу змішування та якість готової суміші безпосередньо залежать від конструкційно-технологічних параметрів змішувача, режимів його роботи та фізико-механічних властивостей змішуваних компонентів.

1.2 Критерії оцінки якості змішування

Якість змішування сипких кормових компонентів є одним із головних показників ефективності роботи змішувача, адже від ступеня однорідності суміші залежать поживна цінність корму, його засвоюваність та стабільність під час зберігання і транспортування. Для кількісної оцінки якості змішування використовують ряд показників, які відображають рівномірність розподілу компонентів у загальному об’ємі суміші.

Основним критерієм є коефіцієнт варіації (V), що визначається за формулою:

$$V = (s / \bar{x}) \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

де s - середньоквадратичне відхилення концентрації контрольного компонента в окремих пробах, %;

$\bar{x}$ - середнє значення його концентрації, %.

Чим менше значення коефіцієнта варіації, тим вищий ступінь однорідності суміші. Для більшості комбікормів вважається, що якісно перемішана суміш має коефіцієнт варіації не більше 5–10 %.

Для визначення ступеня змішування часто застосовують також коефіцієнт однорідності (Ко):

$$Ko = 100 - V, \tag{1.2}$$

Інколи використовують коефіцієнт змішування (Kz), який відображає співвідношення фактичної та максимально можливої дисперсії концентрацій:

$$Kz = 1 - (s^2 / s_0^2), \tag{1.3}$$

де s^2 - дисперсія концентрацій після змішування,

s_0^2 - дисперсія концентрацій до змішування.

При Kz = 1 процес змішування вважається ідеальним, а при Kz = 0 - відсутнім.

До додаткових критеріїв оцінки якості змішування належать:

– тривалість процесу до досягнення заданої однорідності;

– енергетичні витрати на одиницю маси суміші;

– ступінь розшарування під час зберігання та транспортування;

– повторюваність результатів при повторних змішуваннях.

Під час досліджень якості змішування у лабораторних та виробничих умовах найчастіше використовують індикаторні добавки (наприклад, сіль, мідний купорос, крейду або барвники), за вмістом яких у пробах визначають рівномірність розподілу компонентів. Таким чином, кількісна оцінка якості змішування дає змогу об’єктивно порівнювати різні конструкції змішувачів, встановлювати оптимальну тривалість процесу та визначати раціональні конструкційно-технологічні параметри обладнання.

Для визначення якості процесу змішування комбікормів застосовують експериментальні та аналітичні методики, що дають змогу кількісно оцінити ступінь однорідності суміші. Головною метою таких методик є встановлення рівномірності розподілу окремих компонентів у масі корму та визначення ефективності роботи змішувача.

Для аналізу якості змішування зазвичай обирають індикаторний компонент - речовину, концентрацію якої легко визначити аналітичним або фізичним методом. У якості індикаторів використовують кухонну сіль (NaCl), мідний купорос ($CuSO_4$), крейду, фосфати, барвники або мікродобавки. Вибір індикатора залежить від типу суміші, доступності методів аналізу та точності вимірювань.

Після завершення процесу змішування з робочої ємності відбирають 10–20 проб з різних точок об’єму змішувача - зверху, знизу, із середини, з боків. Відібрані зразки зважують, висушують (за необхідності) і готують до аналізу.

У кожній пробі визначають вміст контрольного компонента. Отримані результати записують у таблицю, після чого розраховують середнє значення $\bar{x}$ і середньоквадратичне відхилення s.

Для якісно перемішаної суміші значення V не повинно перевищувати 5–10 %, що відповідає рівню однорідності понад 90 %.

Для наочності результати вимірювань подають у вигляді гістограм або графіків розподілу концентрацій індикатора по об’єму змішувача. Відхилення від середнього значення демонструють ступінь неоднорідності.

У ході досліджень аналізують вплив основних факторів на якість змішування: тривалість роботи змішувача, частоту обертання робочих органів, ступінь заповнення ємності, форму і розташування лопатей або шнеків, а також властивості компонентів (вологість, густина, розмір часток). Результати дозволяють встановити оптимальні конструкційно-технологічні параметри для досягнення необхідного ступеня однорідності при мінімальних енерговитратах.

Після статистичної обробки даних складають висновок про ефективність змішування. Якщо коефіцієнт варіації перевищує допустимі межі, конструкцію або режим роботи змішувача коригують. Таким чином, методики оцінки якості змішування комбікормів базуються на виборі показового компонента, правильному відборі проб, точних аналітичних вимірюваннях і статистичній оцінці отриманих результатів.

Методика оптичного аналізу полягає у визначенні концентрації ключового компонента на основі порівняльного аналізу здатності частинок суміші поглинати, відбивати або заломлювати світло. Такий підхід відзначається високою швидкістю, можливістю автоматизації процесу та придатністю для оцінки багатокомпонентних або важкорозділюваних сумішей. Однак для його реалізації необхідне спеціальне програмне забезпечення та оптичне обладнання. Приклад роботи подібної програми наведено на рисунку 1.1.

Сам процес оптичного аналізу може виконуватись за такими основними алгоритмами:

Перший варіант. Відібрану пробу суміші рівномірно розподіляють тонким шаром на гладкій поверхні, після чого фотографують або сканують. Отримане зображення обробляють за допомогою комп’ютерної програми: кожен піксель зображення має значення, що відповідає кольору певного компонента. Далі визначається діапазон кольорів (пікселів), який відповідає контрольному компоненту, а решта відноситься до основного. За співвідношенням кількості пікселів різних кольорів розраховується концентрація компонентів у суміші.

Другий варіант. Аналіз здійснюють на основі поділу зображення суміші на окремі зони. Для кожної зони визначають площу, яку займає контрольний компонент, і на її основі обчислюють концентрацію. При цьому коефіцієнт неоднорідності коригується з урахуванням випадкових коливань кількості частинок контрольного компонента на поверхні аналізу.

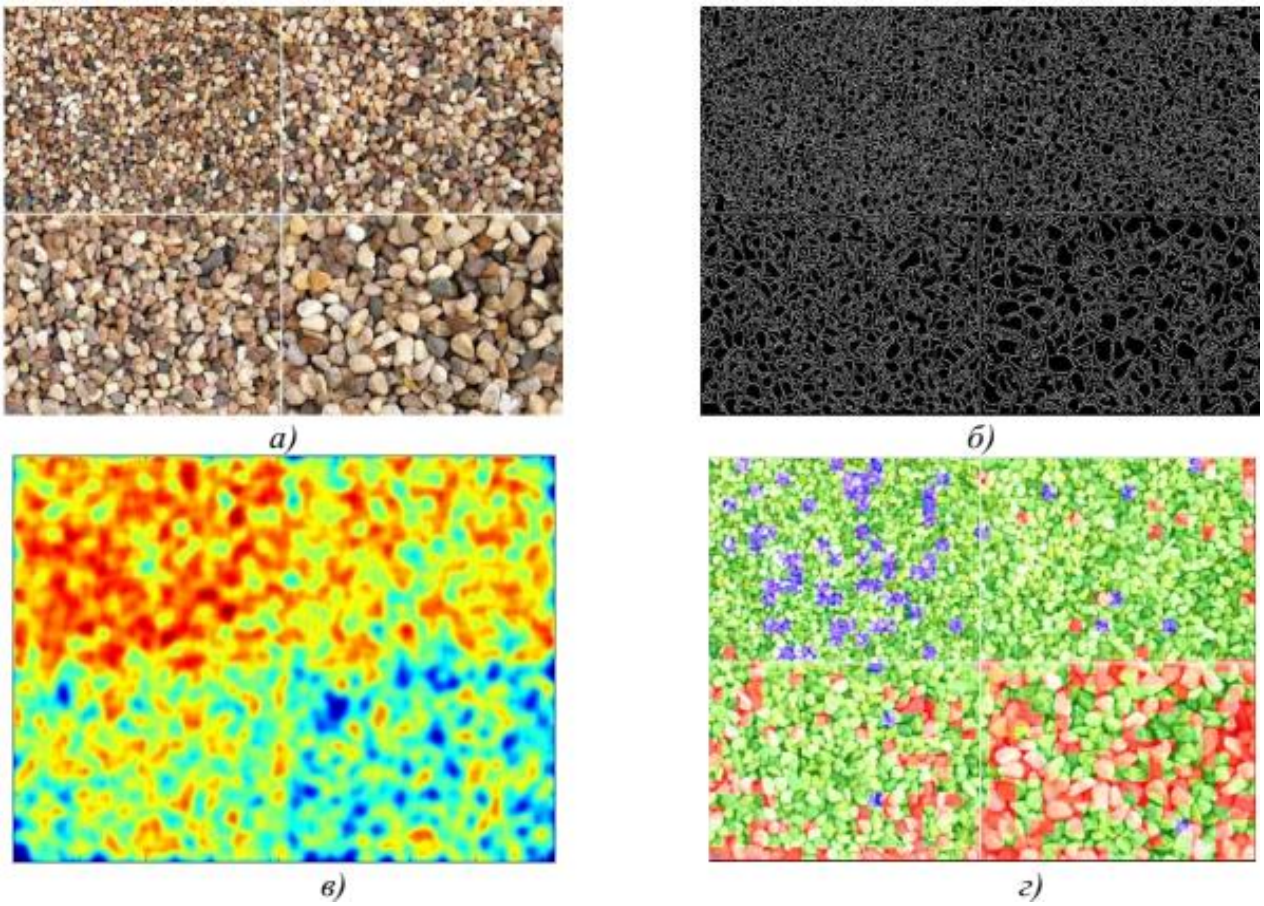


Рисунок 1.1 – Приклад роботи програми:

а) початкове зображення;

б) зображення після обробки оператором Canny (виокремлення контурів);

в) маска М сумарних контурів, позначених одиницею;

г) розподіл фракцій на групи.

До недоліків методу належать можливі похибки кластеризації зображення, зумовлені недостатнім освітленням під час зйомки, що призводить до появи артефактів - тіней, контурних спотворень або зміни відтінків кольору. Це може спричиняти помилки у визначенні меж компонентів і, відповідно, неточності у розрахунку концентрацій.

1.3 Аналіз існуючих конструкцій змішувачів комбікормів

Процес змішування є одним із ключових етапів у виробництві комбікормів, оскільки саме від рівномірності розподілу компонентів залежать поживна цінність і якість готової продукції. Тому вибір типу змішувача визначається фізико-механічними властивостями компонентів, необхідною інтенсивністю змішування, продуктивністю установки та умовами експлуатації.

На практиці для приготування сипких кормових сумішей застосовують різні типи змішувачів, які можна класифікувати за конструкцією та принципом дії:

- за способом дії: механічні, пневматичні, гідравлічні, вібраційні;
- за напрямком перемішування: горизонтальні, вертикальні, комбіновані;
- за принципом перемішування: примусового та вільного перемішування;
- за типом робочих органів: шнекові, лопатеві, барабанні, планетарні, стрічкові тощо.

Найбільш поширеними в комбікормовій промисловості є механічні змішувачі примусового дії, оскільки вони забезпечують високу рівномірність сумішей і простоту обслуговування.

Шнекові змішувачі. У шнекових змішувачах перемішування здійснюється гвинтовим робочим органом, який переміщує частинки корму вздовж корпусу. Існують горизонтальні, вертикальні та конічні варіанти.

Переваги: простота конструкції, рівномірне завантаження, можливість одночасного переміщення та змішування компонентів, низькі енерговитрати.

Недоліки: нерівномірність змішування при великій різниці густини компонентів, обмежена інтенсивність процесу, підвищений знос робочих органів при абразивних матеріалах.

Рисунок 1.2 - Вертикальний шнековий змішувач для сухих комбікормів

Лопатеві змішувачі мають робочі органи у вигляді лопатей, закріплених на валах, що обертаються. Перемішування здійснюється завдяки складному турбулентному русі частинок у робочій камері.

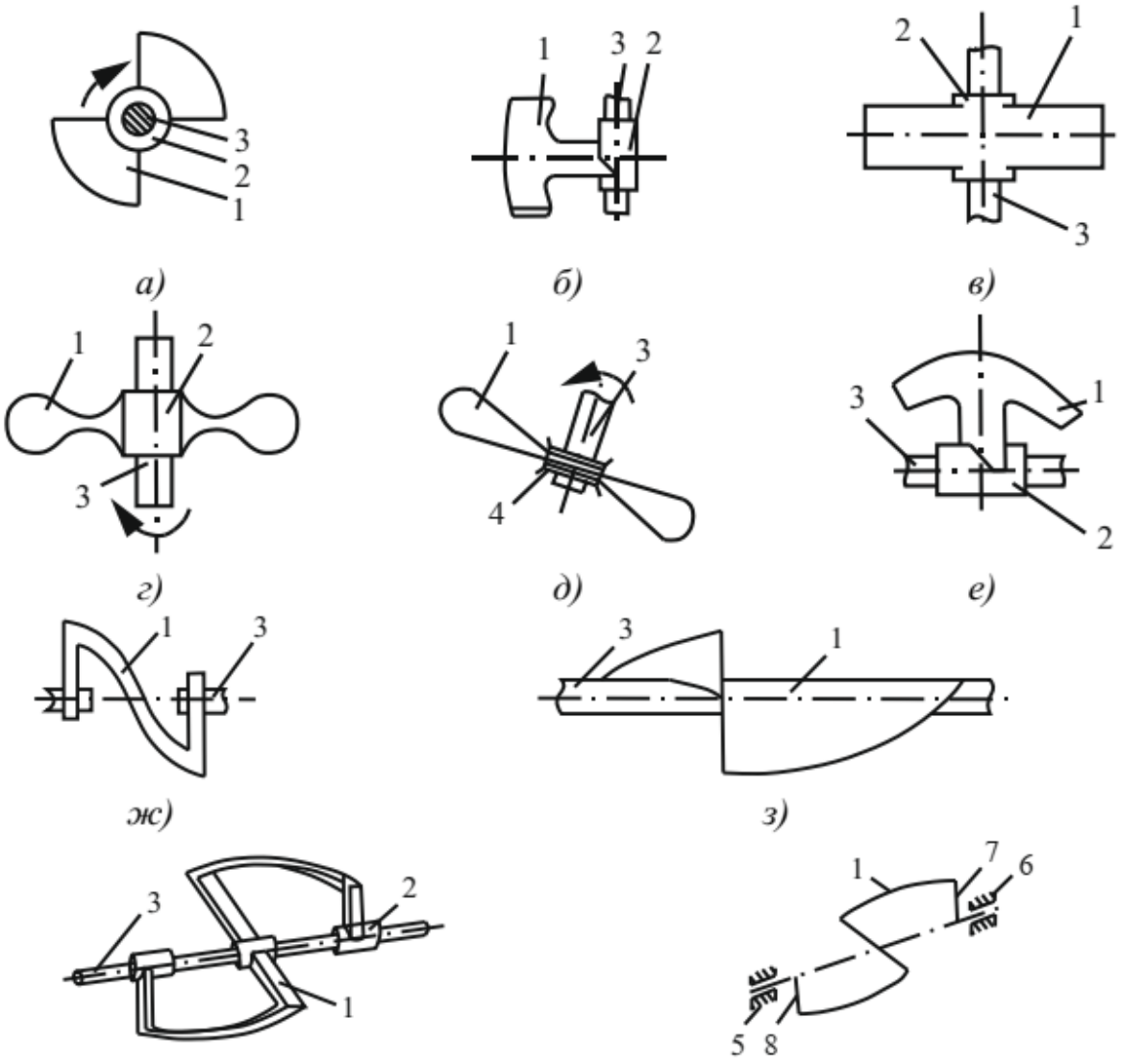
Переваги: висока інтенсивність процесу, рівномірність змішування навіть за різних фракцій компонентів, можливість регулювання часу перемішування.

Недоліки: складність конструкції, підвищені енерговитрати, необхідність періодичного очищення робочої камери від залишків суміші.

Рисунок 1.3 - Двовальний лопатевий швидкісний змішувач Bühler Speedmix DFML для сухих сумішей комбікормів

Рисунок 1.4 - Двовальний лопатевий змішувач Van Aarsen для сухих комбікормів

Основними відмінностями між лопатевими змішувачами є тип лопаті-мішалки, використаної в їхній конструкції (рис. 1.5), та кількість валів.



1 - лопать; 2 - втулка; 3 - вал; 4 - спеціальна шайба; 5, 6 - ліва та права цапфи; 7, 8 - радіальні важелі.

Рисунок 1.5 – Лопаті-мішалки: а) - горизонтальна; б) - похила; в) - вертикальна; г) - пропелерна; д) - спеціальна; е) - якірна; ж) - Z-подібна стрічкова; з) - Z-подібна парусна; і) - Z-подібна литва; к) - гвинтова.

Барабанні змішувачі. У таких змішувачах змішування здійснюється в обертовому барабані, усередині якого відбувається пересипання матеріалу.

Рисунок 1.6 - Барабанний ротаційний змішувач для сухих комбікормів

Переваги: простота конструкції, надійність, мала вартість, можливість безперервної роботи.

Недоліки: низька інтенсивність змішування, великий об’єм при невисокій продуктивності, обмеженість у роботі з дрібнодисперсними сумішами.

Стрічкові змішувачі. Робочий орган складається з двох спіральних стрічок, які переміщують матеріал у протилежних напрямках. Це створює інтенсивне перемішування в усьому об’ємі.

Переваги: висока продуктивність, можливість роботи з широким спектром сипких матеріалів, компактність.

Недоліки: нерівномірне навантаження на привід, обмеження у змішуванні липких або вологих кормів.

Рисунок 1.7 - Горизонтальний змішувач Hayes & Stolz (стрічковий або лопатевий): промислове партійне змішування сухих комбікормів

Планетарні змішувачі мають систему робочих органів, які обертаються одночасно навколо своєї осі й навколо центральної осі камери (за принципом планетарного руху). Такий режим забезпечує багаторазове перетинання потоків і високий ступінь однорідності суміші.

Переваги: надзвичайно висока ефективність змішування, скорочення часу процесу, рівномірність суміші навіть при значній різниці в густині частинок.

Недоліки: складність виготовлення та обслуговування, підвищена вартість, потреба у точному балансуванні та герметизації вузлів.

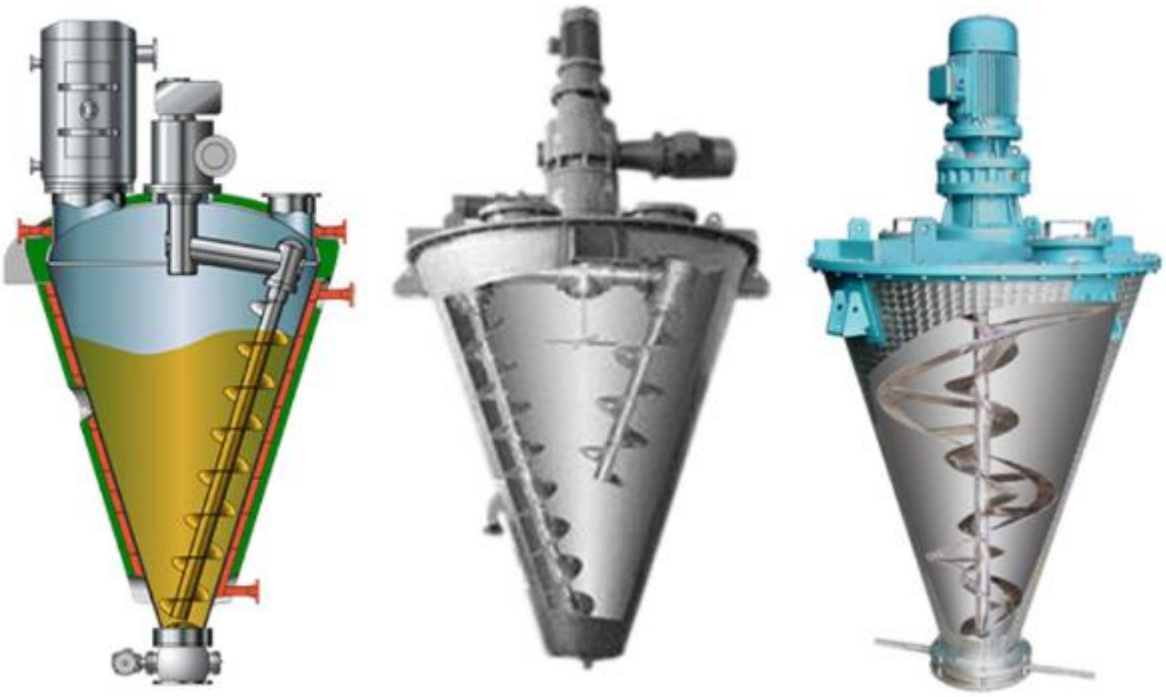


Рисунок 1.8 - Конічний (або планетарний) шнековий змішувач: призначений для сипких матеріалів з відносно однорідною фракцією

Переваги: надзвичайно висока ефективність змішування; відмінна однорідність навіть при великій різниці характеристик компонентів; можуть працювати швидко, з низьким залишком.

Недоліки: дорога конструкція, складна виготовлення та техобслуговування; вимагає точного балансування, гарної герметизації; не завжди економічно виправдані для малих чи середніх виробництв.

При виборі типу змішувача конкретна модель має бути підібрана з урахуванням:

- фізико-механічних властивостей компонентів (фракція, густина, вологість),
- бажаного рівня однорідності суміші,
- обсягу партії та продуктивності лінії,
- доступного бюджету та витрат на обслуговування.

Наприклад, для фермерського господарства з обмеженим бюджетом може бути доцільним вибір шнекового чи лопатевого змішувача (як Dahan або Muyang). Для великих комбікормових заводів - інвестиція у лопатевий високопродуктивний або планетарний змішувач виправдана.

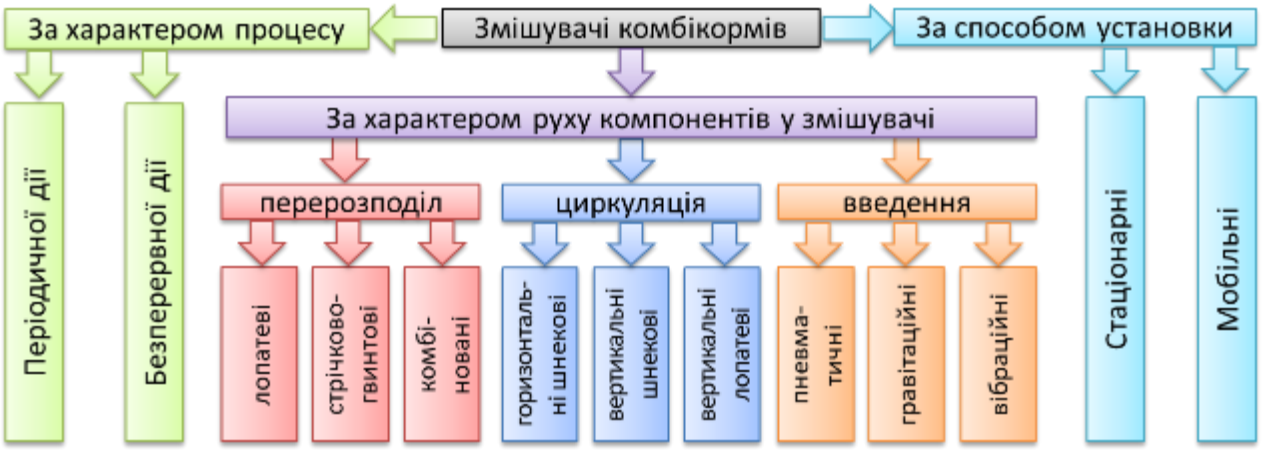


Рисунок 1.8 – Класифікація змішувачів комбікормів

1.4 Висновки

У результаті проведеного аналізу встановлено, що процес змішування є одним із ключових етапів у технології виробництва комбікормів для свиней і птиці, оскільки саме від ступеня однорідності суміші залежить збалансованість раціону, поживна цінність та ефективність засвоєння корму.

Розглянуті типи змішувачів - шнекові, лопатеві, барабанні, планетарні та стрічкові - відрізняються між собою конструкційними особливостями, інтенсивністю процесу та енергетичними витратами. Найвищу якість змішування забезпечують лопатеві та стрічкові конструкції, які створюють складний конвективно-зрізовий рух частинок, що сприяє швидкому досягненню однорідності навіть при значній різниці у густині компонентів.

Особливу увагу заслуговують стрічкові (ribbon) змішувачі, які поєднують простоту конструкції, високу продуктивність та універсальність. Їхня робоча камера дозволяє ефективно перемішувати як порошкоподібні, так і гранульовані компоненти, а двонапрямна робота стрічок забезпечує інтенсивну циркуляцію матеріалу у всьому об’ємі. Такі змішувачі мають невеликі енергетичні витрати, рівномірне навантаження на привід і прості в експлуатації та обслуговуванні.

Водночас аналіз показав, що більшість існуючих промислових стрічкових змішувачів мають потенціал для подальшого удосконалення. Зокрема, до перспективних напрямів розвитку належать:

- оптимізація геометрії стрічкових елементів для підвищення інтенсивності перемішування без збільшення енерговитрат;
- удосконалення систем завантаження та розвантаження з метою зменшення залишків кормової суміші;
- впровадження систем дозованого впорскування рідин (олій, меляс, премікcів) у процесі змішування;
- застосування сучасних матеріалів та покриттів, що зменшують налипання й полегшують очищення робочої камери;
- автоматизація керування технологічним процесом для забезпечення стабільної якості продукції.

Отже, стрічкові змішувачі є найбільш перспективним напрямом удосконалення змішувального обладнання для виробництва комбікормів. Вони поєднують високу ефективність, простоту конструкції та можливість гнучкої модернізації під конкретні технологічні умови, що робить їх базовою платформою для подальших наукових досліджень і розробок у галузі механізації комбікормового виробництва.

2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МІШУВАЧА

2.1 Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів

Рівномірність змішування компонентів комбікорму безпосередньо залежить від конструктивних особливостей змішувача та режимів його роботи. Від правильно обраних конструкційно-технологічних параметрів визначається ефективність процесу перемішування і можливість отримання суміші, що відповідає зоотехнічним вимогам.

Основним недоліком традиційних горизонтальних змішувачів є недостатня інтенсивність перемішування матеріалу в зоні біля вала. Для усунення цієї проблеми пропонується робочий орган у вигляді трьох стрічкових шнеків різного діаметра та кроку, розміщених на одному валу (рис. 2.1). Така схема забезпечує інтенсивний зустрічний рух частинок у робочій камері.

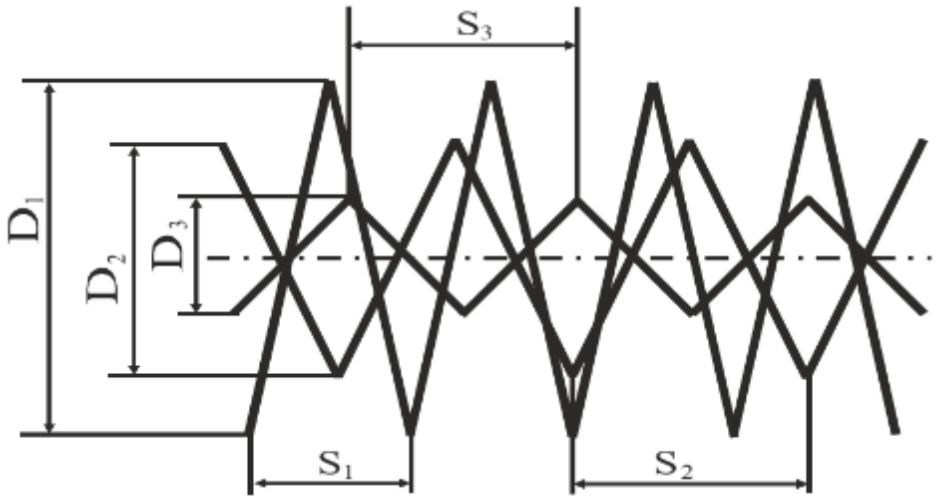


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема

Зовнішній і внутрішній шнеки розташовані так, щоб переміщувати матеріал до центру змішувача, тоді як середній шнек спрямовує потік до торців камери змішування. Це створює замкнений циркуляційний потік, який

сприяє швидкому та рівномірному перемішуванню компонентів. Для досягнення ефективності процесу необхідно, щоб кількість матеріалу, який переміщують зовнішній і внутрішній шнеки, дорівнювала об’єму матеріалу, переміщеному середнім шнеком.

Згідно з технічним завданням, змішувач призначений для роботи з партією комбікорму маса якої становить 1 тону. Виходячи з оптимального співвідношення довжини та ширини робочої камери, прийнято:

зовнішній діаметр зовнішнього шнека - $D_1 = 1,0$ м;

довжина камери змішування - 1,8 м;

діаметр середнього шнека - $D_2 = 0,75$ м;

діаметр внутрішнього шнека - $D_3 = 0,4$ м.

Такі розміри забезпечують рівномірне переміщення матеріалу без утворення застійних зон і сприяють ефективному перемішуванню у всьому об’ємі.

Кількість циклів змішування приймається $N = 3$, що означає: для отримання суміші, яка відповідає зоотехнічним вимогам, необхідно тричі перемістити весь об’єм матеріалу через робочий простір. Один цикл відповідає повному переміщенню всього об’єму матеріалу або одним середнім шнеком, або сумарно зовнішнім і внутрішнім шнеками.

Час змішування прийнято $t = 5$ хвилин, що є типовим для комбікормових установок подібної продуктивності. На основі зазначених вихідних даних визначаються кроки кожного з трьох шнеків і розраховується необхідна потужність приводу, що забезпечує оптимальний режим роботи змішувача.

Рівномірність змішування різних компонентів комбікормів безпосередньо залежить від конструктивних особливостей змішувача та режимів його роботи. Тому ефективність процесу перемішування і можливість отримання сумішей, що відповідають зоотехнічним вимогам, визначається конструкційно-технологічними параметрами, прийнятими за результатами розрахунків. Основним недоліком горизонтальних змішувачів є недостатнє перемішування компонентів у зоні вала змішувача. Виконаємо розрахунок

робочого органу у вигляді трьох стрічкових шнеків різного діаметра і кроку. При цьому зовнішній та внутрішній шнеки переміщують матеріал до центру змішувача, а середній - до торців камери змішування (рис. 2.1). Для ефективного змішування компонентів необхідно, щоб кількість матеріалу, переміщуваного зовнішнім і внутрішнім стрічковими шнеками, була рівною кількості матеріалу, переміщуваного середнім шнеком [71, 64].

$$M = V \cdot \gamma \tag{2.1}$$

де M – маса суміші, т; γ – насипна густина матеріалу, т/м³.

$$V = (\pi D^2 / 4) \cdot l, \tag{2.2}$$

де D – діаметр зовнішньої кромки шнека, м; l – довжина змішувача, м.

$$Q = N \cdot (M / t) \cdot 60 \cdot \chi_1 , \tag{2.3}$$

де Q – кількість переміщуваного матеріалу одним стрічковим шнеком за цикл, т/год;

N – кількість циклів;

t – час змішування, хв; χ_1 – коефіцієнт завантаження змішувача.

$$\upsilon = Q / [900 \pi (D^2 - d^2) \psi \gamma c_0], \tag{2.4}$$

де d – діаметр внутрішньої кромки шнека, м;

ψ – коефіцієнт заповнення міжвиткового простору;

c_0 – коефіцієнт, що враховує просочування матеріалу між корпусом і гвинтовою поверхнею.

$$\psi = \psi_1 \psi_2 \tag{2.5}$$

де ψ_1 – коефіцієнт, що враховує число обертів шнека; ψ_2 – коефіцієнт, що враховує кут нахилу шнека.

$$\psi_1 = 1 - 0{,}0006 \cdot n \tag{2.6}$$

де n – число обертів шнека, $хв^{-1}$.

$$\psi_2 = 1 - 0{,}0005 \cdot \beta, \tag{2.7}$$

де β – кут нахилу осі шнека до горизонту, град.

$$S = 60\ \upsilon / n, \tag{2.8}$$

де S – крок гвинтової лінії шнека, м.

$$\omega = \pi\ n / 30, \tag{2.9}$$

де ω – кутова швидкість обертання шнека, $с^{-1}$.

$$\varphi' = \text{arctg}\ [f_2 \cdot \text{tg}(\alpha + \rho_1)], \tag{2.10}$$

де f_2 – коефіцієнт тертя матеріалу об стінку корпусу; α – кут підйому гвинтової лінії; ρ_1 – кут тертя.

$$\alpha = \text{arctg}\ (\pi\ D / S), \tag{2.11}$$

$$\rho_1 = \text{arctg}\ f_1, \tag{2.12}$$

де f_1 – коефіцієнт тертя матеріалу об поверхню шнека.

$$W_1 = Q\ \upsilon^2 / (270\ g), \tag{2.13}$$

потужність на подолання сил інерції.

$$W_2 = F_k \cdot \upsilon / 750, \tag{2.14}$$

де F_k – сила тертя матеріалу об внутрішню поверхню корпусу.

$$F_k = f_2 (Pc + G \cdot \cos\beta \cdot \cos\varphi'), \tag{2.15}$$

$$Pc = G\, \omega_2^2\, D_0 / (2\, g), \tag{2.16}$$

де ω_2 – кутова швидкість матеріалу;
D_0 – діаметр окружності центру тиску.

$$G = M \cdot g, \tag{2.17}$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с².

$$W_3 = [P_0' D_0 (\omega - \omega_2) / 1500] + [P_0'' D (\omega - \omega_2) / 1500], \tag{2.18}$$

потужність на осьове переміщення матеріалу.

$$P_0' = G \sin\beta \operatorname{tg}(\alpha_0 + \rho_1), \tag{2.19}$$

$$P_0'' = F_k \sin\theta \operatorname{tg}(\alpha_0 + \rho_1), \tag{2.20}$$

$$\alpha_0 = \operatorname{arctg}(\pi S / D_0), \tag{2.21}$$

$$W_0 = (W_1 + W_2 + W_3) \cdot k_0 / \eta_п, \tag{2.22}$$

де k_0 – коефіцієнт защемлення матеріалу;

$\eta_п$ – ККД підшипників вала.

$$W_ш = W_{о1} + W_{о2} + W_{о3}, \quad (2.23)$$

загальна потужність на валу шнека.

$$W_{дв} = W_ш / \eta_{пр}, \quad (2.24)$$

де $\eta_{пр}$ – ККД приводу.

$$\eta_{пр} = \eta_{рем} \cdot \eta_{ред} \cdot \eta_{лан}, \quad (2.25)$$

де $\eta_{рем}$, $\eta_{ред}$, $\eta_{лан}$ – ККД ремінної, редукторної та ланцюгової передач.

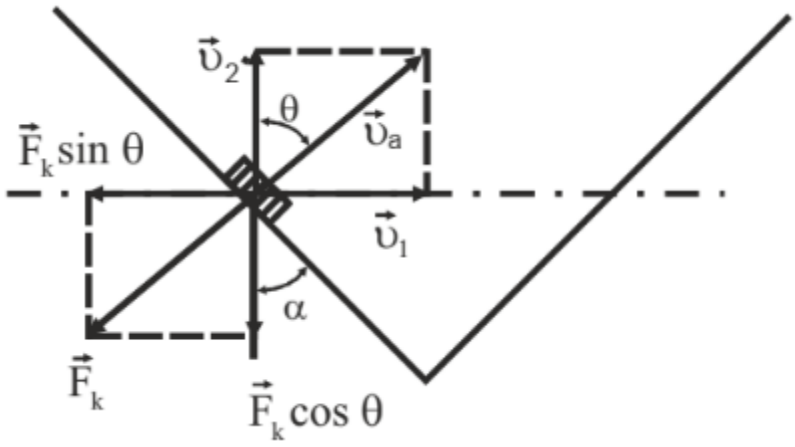


Рисунок 2.2 – Схема розкладання швидкостей на складові

Для розрахунків прийнято: $\gamma = 0{,}7$ т/м³; $\pi = 3{,}14$; $D_1 = 1$ м; $D_2 = 0{,}75$ м; $D_3 = 0{,}4$ м; $d_1 = 0{,}95$ м; $d_2 = 0{,}7$ м; $d_3 = 0{,}35$ м; $l = 1{,}8$ м; $t = 5$ хв; $N = 3$; $\chi_1 = 0{,}75$; $n = 25$ хв$^{-1}$; $\beta = 0°$; $c_o = 0{,}9$; $f_1 = f_2 = 0{,}44$; $\theta = 90°$; $\omega_2 = 0$; $k_o = 1{,}25$ (зовнішній шнек), 1,0 (середній, внутрішній); $\psi = 0{,}7$ (зовнішній шнек), $\psi = 1{,}0$ (середній, внутрішній); $\eta_п = 0{,}98$; $\eta_{рем} = 0{,}97$; $\eta_{ред} = 0{,}97$; $\eta_{лан} = 0{,}94$.

За результатами розрахунків (формули 2.1–2.25) прийнято: крок зовнішнього шнека $S_1 = 0{,}30$ м, середнього $S_2 = 0{,}40$ м, внутрішнього $S_3 = 0{,}75$

м. Для приводу комбінованого стрічкового шнека необхідно встановити електродвигун потужністю Wдв = 11,5 кВт.

2.2 Обґрунтування зміни конструктивних параметрів стрічкового шнека

На основі результатів попередніх експериментальних досліджень було встановлено, що в зоні осі вала змішувача процес перемішування матеріалу відбувається менш інтенсивно, ніж у периферійних областях робочої камери. Це призводить до утворення зон із недостатньою циркуляцією частинок і, відповідно, до зниження однорідності готової кормової суміші.

Для підвищення інтенсивності процесу перемішування в центральній частині змішувача було проведено перерахунок конструктивних параметрів внутрішнього стрічкового шнека (№ 3), зображеного на рисунку 2.3. Виходячи з умови рівномірного осьового переміщення матеріалу, зовнішній діаметр внутрішнього шнека прийнято D = 400 мм. Максимальний крок його витка визначався із врахуванням значення коефіцієнта тертя спокою по сталі для борошнистих матеріалів f = 1,08 – 1,13. Для розрахунку скористаємося схемою на рисунку 2.4.

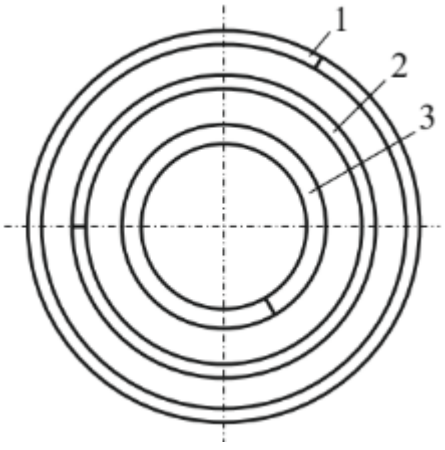


Рисунок 2.3 – Комбінований шнек: 1 – зовнішній; 2 – середній; 3 – внутрішній

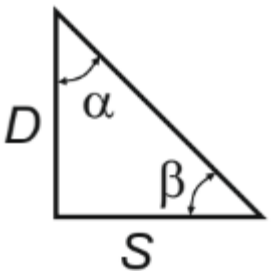


Рисунок 2.4 – Схема до розрахунку: 1 – вал; 2 – виток шнека; 3 – матеріал; D – діаметр шнека; S – крок; α – кут підйому; β – кут тертя

$$\operatorname{tg}\beta = f = 1{,}08 \ldots 1{,}13 \qquad (2.26)$$

$$\beta = 47{,}2 \ldots 48{,}5°$$

$$\alpha = 90 - \beta = 42{,}8°$$

$$S = D \cdot \operatorname{tg}\alpha = 370{,}4 \text{ мм}$$

Таким чином, для забезпечення гарантованого переміщення борошнистого матеріалу вздовж осі вала зі стану спокою крок внутрішнього шнека S_3 не повинен перевищувати 370,4 мм.

Враховуючи конструкційні можливості виготовлення шнека, необхідність забезпечення безперервності процесу перемішування і рівномірності осьового руху частинок, прийнято значення кроку внутрішнього шнека $S_3 = 240$ мм при висоті стрічки 70 мм.

Зменшення кроку витка та збільшення висоти стрічки дає змогу підвищити швидкість осьового переміщення матеріалу й уникнути утворення застійних зон у робочій камері. Завдяки цьому досягається більш рівномірний розподіл частинок по об’єму змішувача.

Для перевірки умов рівномірного змішування виконано розрахунок кількості матеріалу, який переміщується кожним шнеком окремо. Умова ефективної роботи змішувача має вигляд:

$$Q_1 + Q_3 \geq Q_2$$

Швидкість осьового переміщення матеріалу для кожного шнека визначається за формулою:

$$\upsilon = S \cdot n / 60 \qquad (2.27)$$

де n – частота обертання вала, хв$^{-1}$.

Кількість переміщуваного матеріалу кожним шнеком за один робочий цикл:

$$Q = 900\ \pi\ \upsilon\ (D^2 - d^2)\ \psi\ \varphi_0\ c_0 \qquad (2.28)$$

де D – зовнішній діаметр шнека, м;

d – внутрішній діаметр, м;

ψ – коефіцієнт заповнення міжвиткового простору;

φ_0 – насипна густина матеріалу, т/м^3;

c_0 – коефіцієнт просочування матеріалу між корпусом і гвинтовою поверхнею.

Для розрахунків прийнято:

$\varphi_0 = 0{,}75$ т/м^3; $\pi = 3{,}14$; $D_1 = 1$ м; $D_2 = 0{,}75$ м; $D_3 = 0{,}4$ м; $d_1 = 0{,}90$ м; $d_2 = 0{,}65$ м; $d_3 = 0{,}26$ м; $n = 21{,}5$ хв$^{-1}$; $c_{01} = 0{,}9$; $c_{02} = c_{03} = 0{,}8$; $\psi_1 = 0{,}75$ (зовнішній шнек); $\psi_2 = \psi_3 = 1$.

Після проведення розрахунків отримано: $Q_1 = 29{,}22$ т/год; $Q_2 = 34{,}02$ т/год; $Q_3 = 13{,}47$ т/год. Оскільки $Q_1 + Q_3 = 42{,}69$ т/год $> Q_2 = 34{,}02$ т/год, умова рівноваги потоків виконується.

Отже, кількість матеріалу, який переміщується зовнішнім (Q_1) і внутрішнім (Q_3) шнеками, перевищує обсяг, переміщуваний середнім (Q_2) шнеком. Це забезпечує повну та своєчасну вигрузку матеріалу з бункера змішувача. Модернізована конструкція внутрішнього шнека дозволяє значно поліпшити динаміку руху частинок уздовж осі вала, уникнути застійних зон і підвищити рівномірність суміші.

Таким чином, зміна конструкційних параметрів дозволяє інтенсифікувати процес змішування, скоротити час одного циклу та підвищити ефективність роботи всього змішувача.

2.3 Теоретичні дослідження взаємодії поверхні гвинта з матеріалом

Розглянемо процес взаємодії гвинтової поверхні шнека змішувача з сипким матеріалом у горизонтальному апараті. Для цього скористаємося теоремою про зміну кінетичного моменту, яка дозволяє визначити момент сил, що діють на систему під час обертання робочого органу:

$$I\,(d\omega/dt) = M_{об} + \Sigma(N_{м\varphi}\rho + F_{тр\varphi}\rho), \qquad (2.29)$$

де I – момент інерції вала змішувача разом із гвинтовою поверхнею та масою матеріалу, який бере участь у переносному русі;

ω – кутова швидкість вала;

$M_{об}$ – обертальний момент, створений приводом і прикладений до вала;

Nмφ – нормальна реакція матеріалу, що діє на елементарну площадку гвинтової поверхні у проєкції на напрям її руху (циліндрична вісь $\vec{p}$);

Fтрφ – сила тертя матеріалу, прикладена до елементарної площадки гвинтової поверхні в проєкції на вісь $\vec{p}$;

ρ – радіус у циліндричних координатах елементарної площадки, який є плечем сил відносно осі обертання.

Σ – знак сумування моментів сил, прикладених до всіх елементарних площадок гвинтової поверхні (рис. 2.5).

Для динамічного аналізу взаємодії матеріалу з гвинтовою поверхнею приймемо такі припущення: 1) сили тяжіння, прикладені до частинок матеріалу, симетричні відносно вертикальної осі змішувача та не впливають на обертальний момент шнека; 2) у процесі взаємодії елементарного об’єму матеріалу з елементарною ділянкою гвинтової поверхні силами тертя між сусідніми елементарними об’ємами можна знехтувати.

Якщо шнек обертається з постійною кутовою швидкістю ($d\omega/dt = 0$), то момент, необхідний для підтримання цього руху (без урахування конструкційного тертя), визначається виразом:

$$M_{об} = -\Sigma(N_м \varphi\rho + F_{тр}\varphi\rho). \quad (2.30)$$

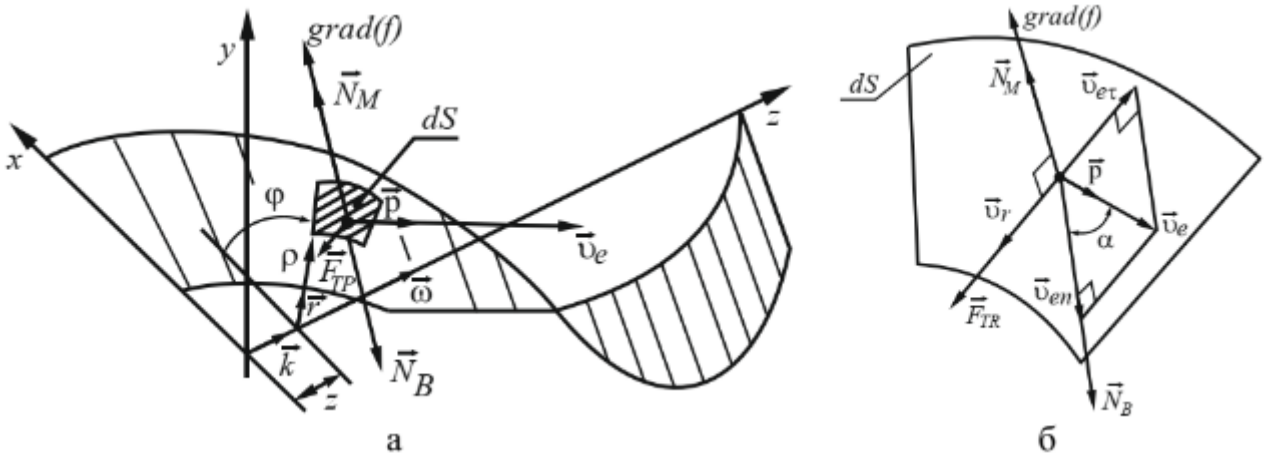


Рисунок 2.5 – Схема взаємодії гвинтової поверхні з матеріалом у змішувачі: а) осі координат і сили; б) елементарна площадка – фрагмент гвинтової поверхні та напрямки швидкостей руху частинок матеріалу.

Нормальна реакція $\vec{N}_м$ спрямована за градієнтом до поверхні гвинта. Рівняння гвинтової поверхні у циліндричних координатах має вигляд:

$$f(\rho, \varphi, z) = z - a\varphi = 0. \quad (2.31)$$

Вектор градієнта до цієї поверхні можна розкласти на складові по циліндричних ортах ($\vec{r}$, $\vec{p}$, $\vec{k}$):

$$\text{grad}(f) = (\partial f/\partial\rho)\,\vec{r} + (1/\rho)(\partial f/\partial\varphi)\,\vec{p} + (\partial f/\partial z)\,\vec{k}. \quad (2.32)$$

Часткові похідні в цьому виразі дорівнюють:

$$\partial f/\partial\rho = 0;\ \partial f/\partial\varphi = -a;\ \partial f/\partial z = 1. \quad (2.33)$$

Отже, градієнт до поверхні визначається як:

$$\text{grad}(f) = -(a/\rho)\,\vec{p} + 1\cdot\vec{k}. \qquad (2.34)$$

Модуль цього вектора дорівнює:

$$|\text{grad}(f)| = \sqrt{((a/\rho)^2 + 1)}. \qquad (2.35)$$

Нормальна реакція $\vec{N}_м$ має проєкції, пропорційні проєкціям вектора градієнта на осі циліндричних координат:

$$N_{м\rho} = 0;\ N_{м\varphi} = -\lambda(a/\rho);\ N_{мz} = \lambda. \qquad (2.36)$$

де λ – невизначений множник Лагранжа.

Для правої гвинтової поверхні, згідно з рівнянням (2.31), при $\vec{\omega}$, спрямованій уздовж осі z, значення λ буде додатним ($\lambda \geq 0$). Величина сили $\vec{N}_м$ визначає за модулем силу тертя $\vec{F}_{тр}$ відповідно до закону сухого тертя Кулона з коефіцієнтом $k_{тр}$:

$$|\vec{F}_{тр}| = k_{тр}\,|\vec{N}_м| = k_{тр}\,\lambda\,\sqrt{((a/\rho)^2 + 1)}. \qquad (2.37)$$

Таким чином, взаємодія матеріалу з гвинтовою поверхнею описується співвідношенням між нормальними та дотичними силами, що виникають у зоні контакту. Отримані залежності дозволяють визначати динамічні навантаження, що діють на стрічкову поверхню шнека, а також враховувати вплив геометричних параметрів витків (кут підйому, крок, радіус) на інтенсивність перемішування матеріалу в змішувачі. Це є важливим для подальшого теоретичного обґрунтування режимів роботи шнека та вибору оптимальних конструкційних параметрів змішувача.

2.4 Дослідження впливу параметрів змішувача на енергетичні показники

На рисунку 2.6 наведено просторові поверхні, що відображають зміну потужності від 180,09 до 1462,7 Вт залежно від частоти обертання вала змішувача (1,05…4,19 рад/с) та кроку витка стрічки (0,2…0,6 м) для середнього шнека відповідно до прийнятої математичної моделі.

Поверхні, побудовані за першим і третім складниками (рис. 2.6), відображають витрати потужності відповідно на надання матеріалу швидкості від нуля до номінального значення та подолання сили тертя між шарами матеріалу з урахуванням висоти заповнення камери змішування. Максимальне споживання потужності спостерігається при кроці витка 0,6 м та частоті обертання вала 4,19 рад/с.

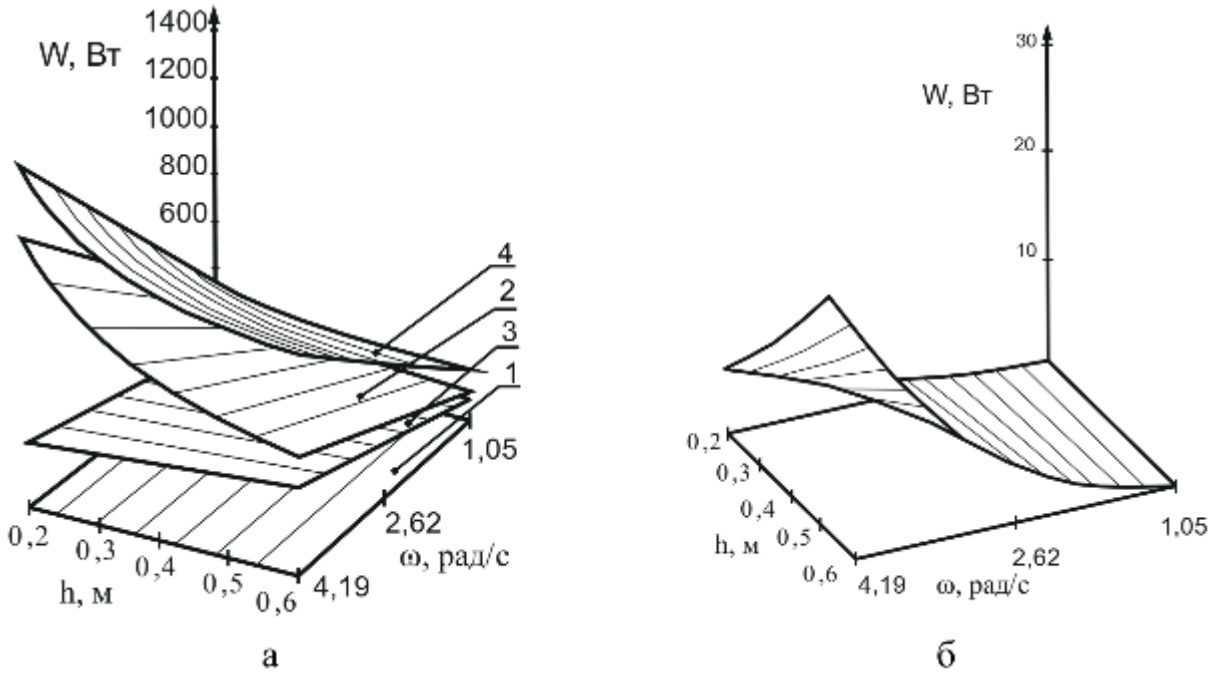


Рисунок 2.6 – Залежність потужності від частоти обертання вала ω і кроку витка стрічки h для середнього шнека: а) 1 – поверхня, побудована за першим складником; 2 – за другим; 3 – за третім; 4 – сумарна поверхня за всіма трьома складниками; б) – поверхня, побудована за першим складником.

Натомість поверхня, побудована за другим складником, який враховує силу тертя матеріалу об поверхню шнека, демонструє, що найбільше значення споживаної потужності досягається при кроці 0,2 м і тій самій частоті 4,19 рад/с. Це пояснюється тим, що зі зменшенням кроку збільшується кількість витків на одиницю довжини шнека, отже, зростає площа контакту між матеріалом і стрічкою, а разом із цим - сила тертя.

Перший і третій складники також враховують тертя, проте їхній внесок у загальну потужність є меншим. Величини, отримані за другим складником, значно перевищують ті, що визначені за першим і третім, тому форма сумарної поверхні (4) практично повторює форму поверхні, побудованої за другим складником (рис. 2.6, а).

Зміна кроку шнека від 0,2 до 0,6 м при збільшенні частоти обертання від 1,05 до 2,09 рад/с майже не впливає на загальне споживання потужності. Для сумарної поверхні (4) при частоті 2,09 рад/с зміна не перевищує 150 Вт.

Таким чином, можна зробити висновок, що частота обертання вала змішувача не повинна перевищувати 2,09 рад/с, оскільки споживана потужність зростає квадратично із частотою. Оптимальним вважається збільшення кроку шнека, проте з урахуванням якості змішування найраціональніший діапазон кроків для середнього шнека становить 0,4–0,6 м.

На рисунку 2.7 подано поверхні, які ілюструють зміну потужності залежно від ширини стрічки шнека ($\rho k - \rho 0$) та його кроку h. Розрахунки виконано згідно з математичною моделлю, що враховує три основні складники потужності.

Аналіз поверхні 1 (перший складник, який враховує витрати енергії на розгін матеріалу від нуля до номінальної швидкості) показує, що при кроці 0,2 м зміна ширини стрічки від 30 до 120 мм майже не впливає на потужність (від 0,55 до 1,9 Вт), тоді як при кроці 0,6 м потужність зростає від 2,4 до 9,5 Вт. Це пояснюється більшими швидкостями осьового переміщення при більшому кроці. Мінімальна потужність спостерігається при h = 0,2 м і ширині 30 мм, максимальна - при h = 0,6 м і ширині 120 мм.

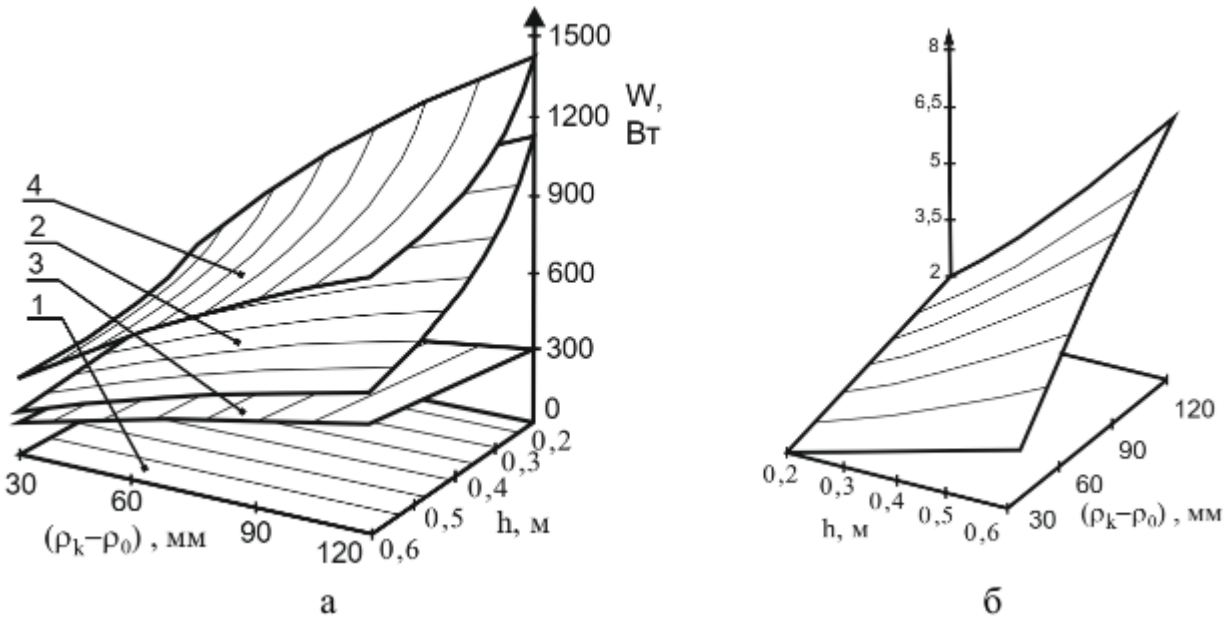


Рисунок 2.7 – Залежність потужності від ширини стрічки шнека (ρk–ρ0) і його кроку h для середнього шнека: а) 1 – поверхня, побудована за першим складником; 2 – за другим; 3 – за третім; 4 – сумарна поверхня; б) – поверхня за першим складником.

Поверхня 2 (другий складник, який враховує тертя матеріалу об шнек) демонструє протилежну тенденцію: мінімум потужності спостерігається при h = 0,6 м, b = 30 мм, а максимум - при h = 0,2 м, b = 120 мм. При зменшенні кроку та збільшенні ширини стрічки зростає площа контакту, а отже - сила тертя і потужність приводу.

Поверхня 3 (третій складник, тертя шарів матеріалу між собою) має подібну форму до першої: мінімум при h = 0,2 м, b = 30 мм, максимум - при h = 0,6 м, b = 120 мм. Збільшення ширини стрічки впливає на потужність сильніше (від 130 до 400 Вт) ніж зміна кроку.

Отже, сумарна поверхня (4) (рис. 2.7, а) вказує, що оптимальні параметри середнього шнека становлять: крок 0,4–0,6 м, ширина стрічки 30–50 мм - саме при цих параметрах споживана потужність є мінімальною, а процес перемішування залишається ефективним.

На рисунку 2.8 наведено результати дослідження впливу ступеня завантаження змішувача (10–95%) на споживану потужність середнім шнеком.

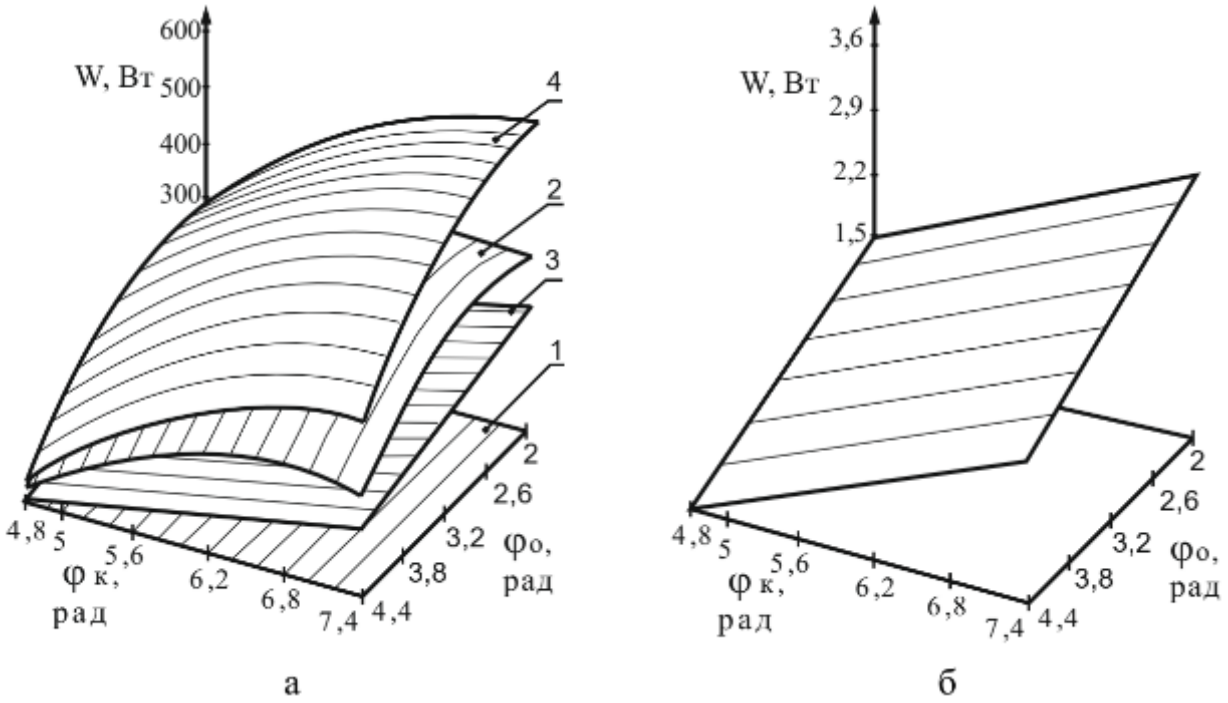


Рисунок 2.8 – Залежність потужності від ступеня завантаження змішувача для середнього шнека: а) 1 – поверхня за першим складником; 2 – за другим; 3 – за третім; 4 – сумарна поверхня; б) – поверхня за першим складником.

Аналіз рисунка показує, що найбільша потужність - 360 Вт при завантаженні 95% - отримана за другим складником, який враховує тертя матеріалу об шнек.

Найменша - 2,9 Вт - за першим складником, який враховує енергію, витрачену на розгін частинок.

Третій складник займає проміжне положення (230 Вт при завантаженні 95%).

Залежності за першим і третім складниками мають майже лінійну форму, тоді як за другим - криволінійну, що відображає зростання сили тертя при збільшенні заповнення камери.

При зміні завантаження від 55% до 75% початковий кут взаємодії середнього шнека з матеріалом φ_0 змінюється від 3,10 до 2,68 рад, а кінцевий φ_k - від 6,32 до 6,74 рад. У цьому випадку потужність двигуна, необхідна для приводу шнека, зростає від 460 до 510 Вт.

На рисунку 2.16 показано узагальнену криву залежності потужності змішувача від ступеня заповнення камери змішування.

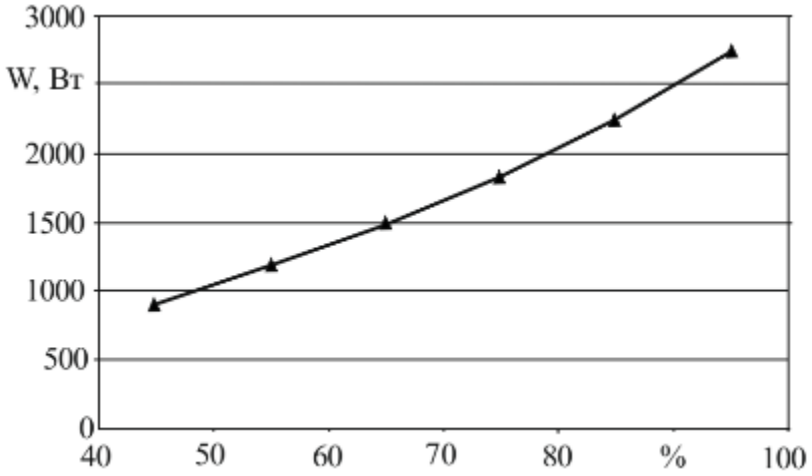


Рисунок 2.9 – Залежність розрахункової потужності від заповнення камери змішування

Математичне рівняння цієї залежності має вигляд:

$$W = –385,0 + 39,413x – 0,3703x^2 + 0,0032x^3. \quad (2.38)$$

Отримана крива є поліномом третього ступеня, що точно описує характер зростання потужності при збільшенні заповнення змішувача. Форма кривої є нелінійною, оскільки зі зростанням висоти шару матеріалу

збільшується площа його контакту з робочими поверхнями шнеків, а отже - і сумарна сила тертя.

У результаті теоретичних досліджень встановлено, що споживана потужність змішувача значною мірою залежить від частоти обертання вала, кроку та ширини стрічки шнека, а також від ступеня заповнення камери змішування.

Для забезпечення енергоефективної роботи та якісного змішування доцільно приймати такі параметри:

– частота обертання вала $\omega \leq 2{,}1$ рад/с;

– крок стрічки $h = 0{,}4–0{,}6$ м;

– ширина стрічки $b = 30–50$ мм;

– ступінь заповнення змішувача 70–80%.

2.5 Висновки

У другому розділі виконано теоретичне обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів змішувача комбікормів, проведено розрахунки основних геометричних і кінематичних характеристик робочих органів, а також досліджено взаємодію гвинтової поверхні шнека з сипким матеріалом.

Встановлено, що рівномірність змішування кормових компонентів у значній мірі визначається геометрією робочої камери, кроком і шириною стрічки шнека, а також режимними параметрами роботи змішувача - частотою обертання вала, тривалістю циклу та ступенем заповнення змішувальної камери. Розрахунки показали, що для забезпечення інтенсивного перемішування без утворення застійних зон оптимальним є використання трьох комбінованих шнеків різного діаметра та кроку, розташованих на одному валу. При цьому зовнішній і внутрішній шнеки транспортують матеріал до центра камери, а середній - до торців, забезпечуючи циркуляцію потоку та рівномірність суміші.

Аналітичні залежності, отримані при моделюванні процесу, дали змогу визначити енергетичні витрати змішувача. Зокрема, встановлено, що потужність, необхідна для роботи шнека, зростає квадратично зі збільшенням частоти обертання, тоді як надмірне зменшення кроку призводить до підвищення сил тертя та перевитрат енергії. У результаті оптимальні параметри для середнього шнека визначено в межах:

– крок витка h = 0,4–0,6 м;

– ширина стрічки b = 30–50 мм;

– частота обертання вала $\omega \leq 2{,}1$ рад/с;

– ступінь заповнення змішувача 70–80 %.

Проведений аналіз підтвердив доцільність удосконалення конструкції внутрішнього шнека шляхом зменшення його кроку до 240 мм і збільшення висоти ленти до 70 мм, що дає можливість уникнути застійних зон у центральній частині змішувача та забезпечити повне переміщення матеріалу вздовж осі вала.

Отже, результати теоретичних досліджень свідчать, що запропонована конструкція комбінованого триланцюгового стрічкового шнека забезпечує підвищення інтенсивності процесу змішування, зниження енергоємності та покращення однорідності комбікорму. Отримані параметри будуть використані під час розроблення програми експериментальних досліджень у наступному розділі роботи.

3 ЕКСПЕРИМНЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІШУВАЧА

3.1 Програма експериментальних досліджень

Якість змішування сипучих кормових компонентів є одним із головних показників ефективності роботи змішувача комбікормів. Фактори, що залежать від технологічних властивостей зерна (вологість, фракційний склад, сипкість, коефіцієнт тертя), мають суттєвий вплив на рівномірність суміші та стабільність технологічного процесу.

Оскільки у комбікормовому виробництві переважно використовують зернові матеріали кондиційної якості, для підвищення ефективності процесу змішування необхідно раціонально поєднати конструктивні та технологічні параметри роботи обладнання. Найбільший вплив на якість суміші мають:

– частота обертання гвинта;

– кут нахилу стрічки;

– довжина змішувальної камери;

– тривалість процесу;

– повнота заповнення бункера;

– масова частка контрольного (мінорного) компонента.

Відповідно до поставлених завдань дослідження об’єктом є процес змішування сипучих компонентів комбікормів у стрічково-гвинтовому змішувачі, а предметом - вплив конструктивно-технологічних параметрів на енергоємність і якість змішування.

Метою експериментів є:

- розроблення удосконаленої технологічної схеми змішувача комбікормів;

- встановлення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів процесу змішування;

- визначення вмісту контрольного компонента суміші та коефіцієнта неоднорідності;

- статистична обробка результатів і побудова регресійних залежностей;
- порівняння теоретичних і експериментальних даних.

Основні напрямки експериментів:

- визначення впливу технологічних параметрів процесу змішування на якість готового продукту.
- оцінка впливу тих самих параметрів на продуктивність і енергоємність процесу.

3.2 Об’єкти експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проводилися з метою перевірки достовірності теоретичних залежностей, встановлених у розділі 2, та визначення фактичних показників якості змішування у стрічково-гвинтовому змішувачі.

Об’єктом дослідження є удосконалена конструкція комбінованого змішувача з трьома стрічковими шнеками, що забезпечує переміщення матеріалу до центра та до торців камери змішування.

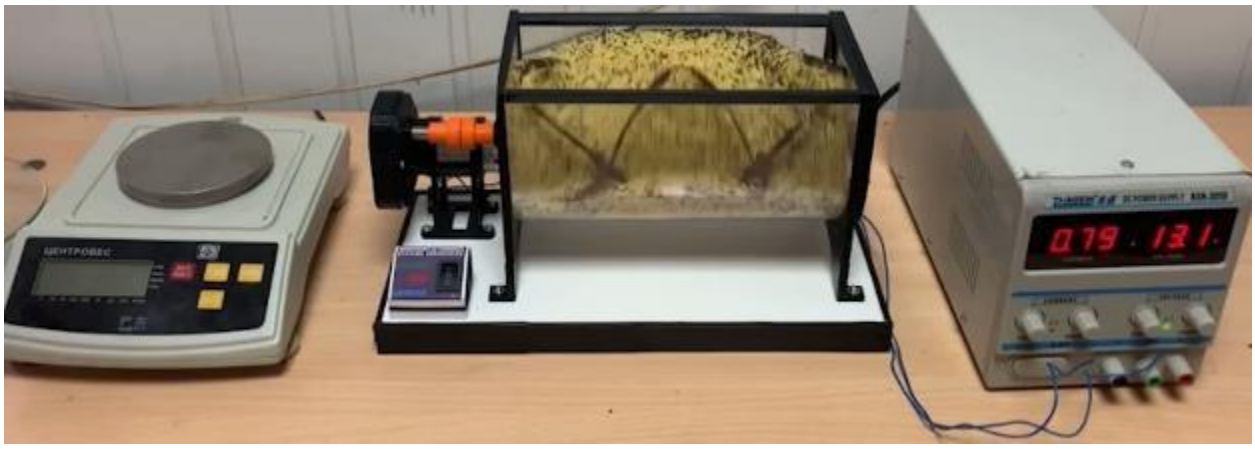


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд експериментальної установки

Випробування виконувалися на експериментальній лабораторній установці (рис. 3.1), до складу якої входять:

блок живлення Zhaoxin RXN-305D;

електродвигун постійного струму з регульованою швидкістю;

електронні ваги для контролю наважки проб;

аналітичні ваги для зважування контрольного компонента.

Рисунок 3.2 – Процес змішування

Рисунок 3.2 – Відбір проб

3.3 Методика проведення експерименту

Для кількісної оцінки процесу змішування застосовували два основні критерії оптимізації: питома енергоємність q, Вт·год/кг та однорідність суміші V_C, %.

Питому енергоємність визначали за формулою:

$$q = \frac{W}{Q}, \tag{3.1}$$

Де W – потужність приводу змішувача, Вт;

Q – продуктивність змішувача, кг/год.

Продуктивність змішувача обчислювали з урахуванням часу, необхідного для приготування однієї наважки масою

$$Q = \frac{M}{t}, \tag{3.2}$$

де t – час продуктивної роботи, год.

Потужність приводу визначали за електричними параметрами двигуна:

Однорідність змішування обчислювали за формулами:

$$V_c = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n}\frac{B_i}{B_o} \text{ при } B_i < B_o, \tag{3.3}$$

$$V_c = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n}\frac{2B_o - B_i}{B_o} \text{ при } B_i > B_o, \tag{3.4}$$

B_i – фактичний вміст контрольного компонента в і-ій пробі, %;

B_o – номінальний (заданий) вміст контрольного компонента, %;

n – кількість проб.

Значення B_o приймалося рівним 5, 10 та 15 %.

Фактичний вміст визначали експериментально за співвідношенням:

$$B_i = \frac{m_i}{m_{пр}} \cdot 100, \tag{3.5}$$

m_i – маса контрольного компонента в пробі, кг;

$m_{пр}$ – маса проби, кг.

Маса кожної проби становила близько 2 % від загального завантаження змішувача (0,55 ± 10 % кг).

3.4 Аналіз результатів досліджень

Для кількісної оцінки впливу основних режимних параметрів на однорідність змішування сипких кормових компонентів було застосовано метод математичного планування багатофакторного експерименту. Такий підхід дозволяє встановити не лише індивідуальний вплив кожного параметра, але й ефект їхньої взаємодії, а також визначити оптимальні комбінації факторів для досягнення максимальної якості змішування.

Як фактори обрано:

- x_1 - частота обертання вала змішувача, об/хв;
- x_2 - тривалість змішування, хв;
- x_3 - вміст мінімального компоненту, %.

Експеримент проведено за D-оптимальним планом, що забезпечує найменшу кореляцію між факторами.

Математичну обробку експериментальних даних виконували методом факторного планування експериментів з використанням D-оптимальних планів, що забезпечує мінімізацію кореляції між факторами та максимальну інформативність результатів при обмеженій кількості дослідів. Для кожного критерію оптимізації - питомої енергоємності q (Вт·год/кг) та однорідності суміші V_c (%) - будували окремі рівняння регресії другого порядку у кодованих змінних:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2$$

де x_1 - частота обертання вала (ω, рад/с),

x_2 - крок витка стрічки (h, м),

x_3 - ступінь заповнення камери змішування (F).

Коефіцієнти регресії обчислювали за допомогою програми Statistica 6.12, використовуючи функції регресійного аналізу (Regression → Response Surface). Для кожного рівня варіювання факторів формувалася матриця експерименту, що дозволила побудувати поверхні відгуку, які наочно демонструють закономірності зміни показників q та V_c.

На основі математичної моделі побудовано поверхні відгуку, що демонструють зміну показників V_s залежно від поєднання основних факторів. Це дозволило оцінити взаємодію між частотою, тривалістю і складом суміші та виявити області оптимального режиму роботи змішувача.

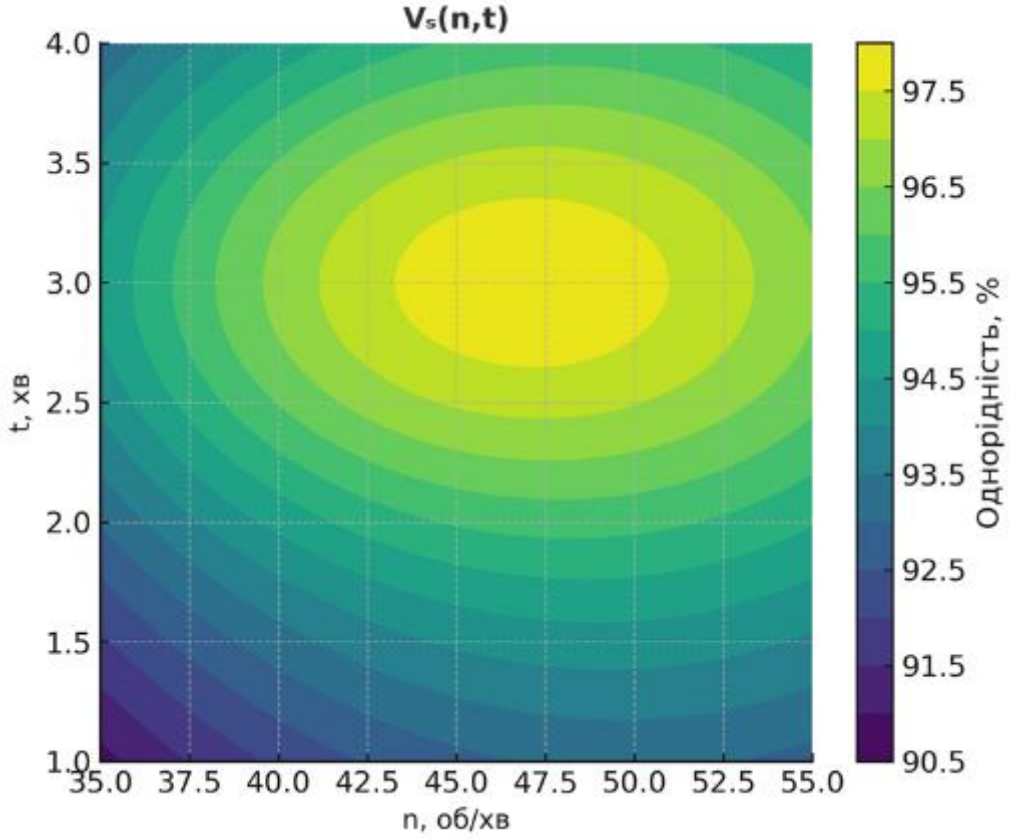


Рисунок 3.3 – Залежність однорідності суміші $V_s(n,t)$.

Зі збільшенням частоти обертання вала та часу змішування спостерігається зростання показника однорідності. Оптимальна область (97–98 %) відповідає n = 45–50 об/хв та t = 3–3,2 хв. При подальшому збільшенні

частоти понад 50 об/хв відбувається незначне погіршення через сегрегацію компонентів.

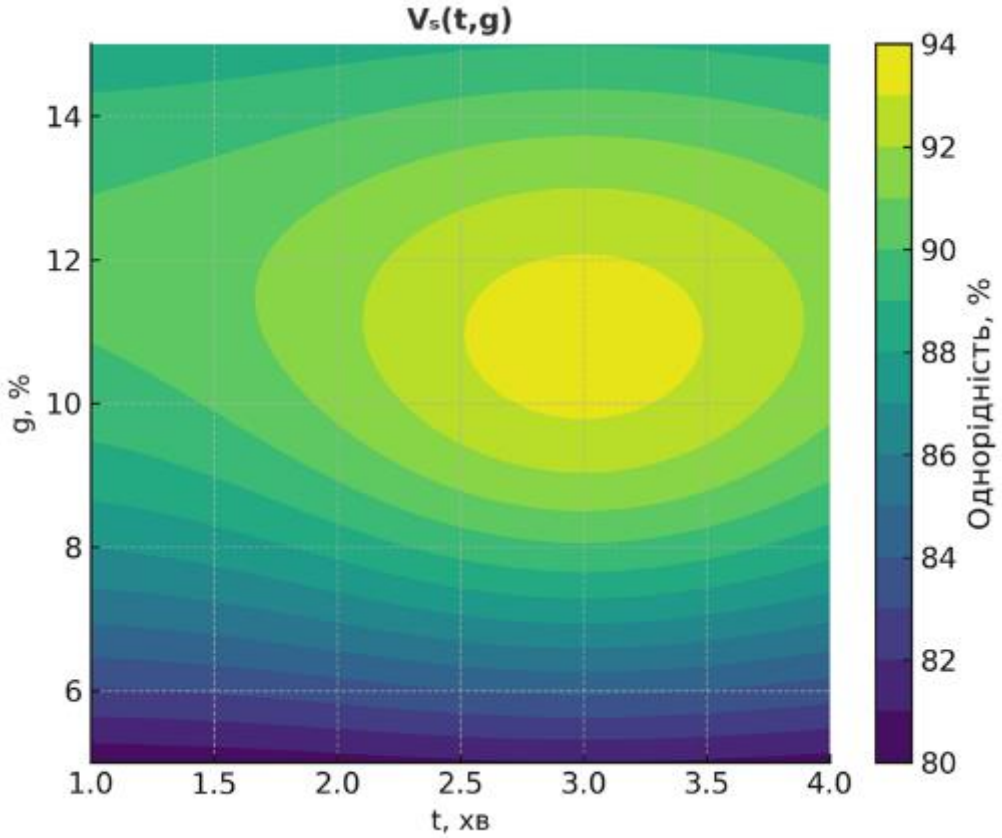


Рисунок 3.4 – Залежність однорідності суміші $V_s(t,g)$

Залежність (рис. 3.4) демонструє, що збільшення вмісту мінімального компонента з 5 до 15 % має майже лінійний вплив на однорідність. При цьому характер кривих свідчить, що навіть незначне збільшення тривалості процесу забезпечує суттєве покращення якості змішування. Найвища однорідність досягається при t = 3–3,5 хв та вмісті мінімального компоненту g = 8–12 %. У цьому діапазоні процес характеризується рівномірним розподілом часток і стабільною структурою суміші.

Як видно з рис. 3.5, вплив частоти обертання на однорідність зростає лише до певної межі, після чого настає стабілізація. Зростання вмісту мінімального компоненту при сталих обертах не змінює суттєво результату, що підтверджує домінування динамічних факторів (n, t) над композиційними (g).

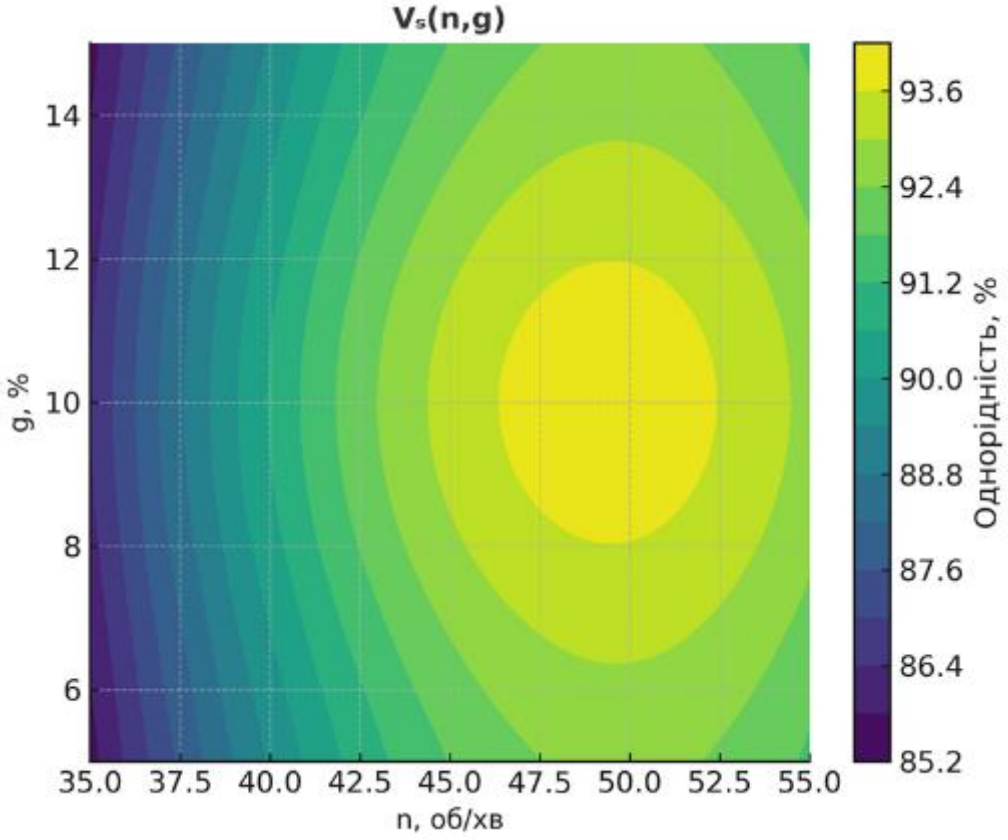


Рисунок 3.4 – Залежність однорідності суміші $V_s(n,g)$

Вплив частоти обертання є домінуючим. При n = 45–50 об/хв та g ≈ 10 % досягається найвища якість змішування. Подальше підвищення частоти не дає покращення результату, оскільки інерційні сили сприяють розшаруванню матеріалу.

Для більшої наочності введено комплексний показник режиму змішування k=n·t, який характеризує кількість взаємопереміщень частинок.

Аналіз (рис. 3.6) показує типову кінетику процесу змішування:

- етап конвективного перемішування – стрімке зростання однорідності;
- етап дифузійного вирівнювання – уповільнення зростання;
- етап сегрегації – поступове зниження якості суміші.

Максимум однорідності спостерігається при k=120–170 об., що відповідає часу 3–3,5 хв при частоті 45–50 об/хв. Зі збільшенням частки мінімального компоненту зона сегрегації звужується, а оптимальний діапазон зсувається у бік більших значень k.

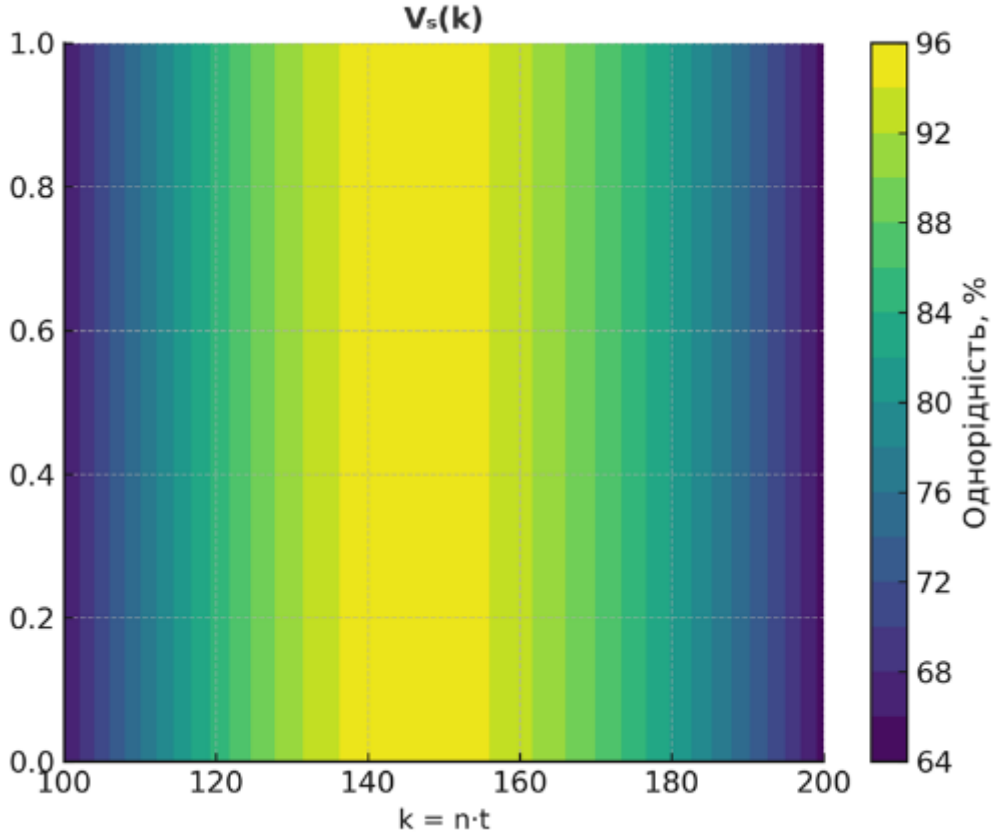


Рисунок 3.5 – Залежність однорідності суміші $V_s(k)$, де $k = n \cdot t$

Крива демонструє три фази процесу змішування: конвективну, дифузійну та сегрегаційну. Максимум однорідності (~98 %) спостерігається при k = 130–160 об. За межами цієї області процес стає енергетично неефективним.

Математичне моделювання підтвердило адекватність вибраних факторів і нелінійний характер їхнього впливу. Найбільший внесок у процес змішування мають частота обертання і час, тоді як концентрація мінімального компоненту має другорядне значення. Оптимальні параметри для досягнення Vc≥97%: n=45–50об/хв, t=3–3,2хв, g=8–12 %. Поверхні відгуку дозволяють наочно визначити межі енергетично раціональної роботи змішувача без зниження якості комбікормів.

Далі було розглянуто енергетичні характеристики комбінованого змішувача сипких кормових сумішей. За результатами експериментальних

досліджень отримано аналітичну залежність між частотою обертання робочого органу *n* та потужністю, необхідною для приводу змішувача:

$$P=2{,}1n^2-156{,}7n+35{,}7 \quad (3.6)$$

Це рівняння другого порядку описує квадратичне зростання потужності з підвищенням швидкості обертання.

Графічна інтерпретація моделі (рис. 3.6) демонструє високий ступінь кореляції між теоретичними та експериментальними даними ($R = 0{,}97$), а різниця результатів не перевищує 35 %.

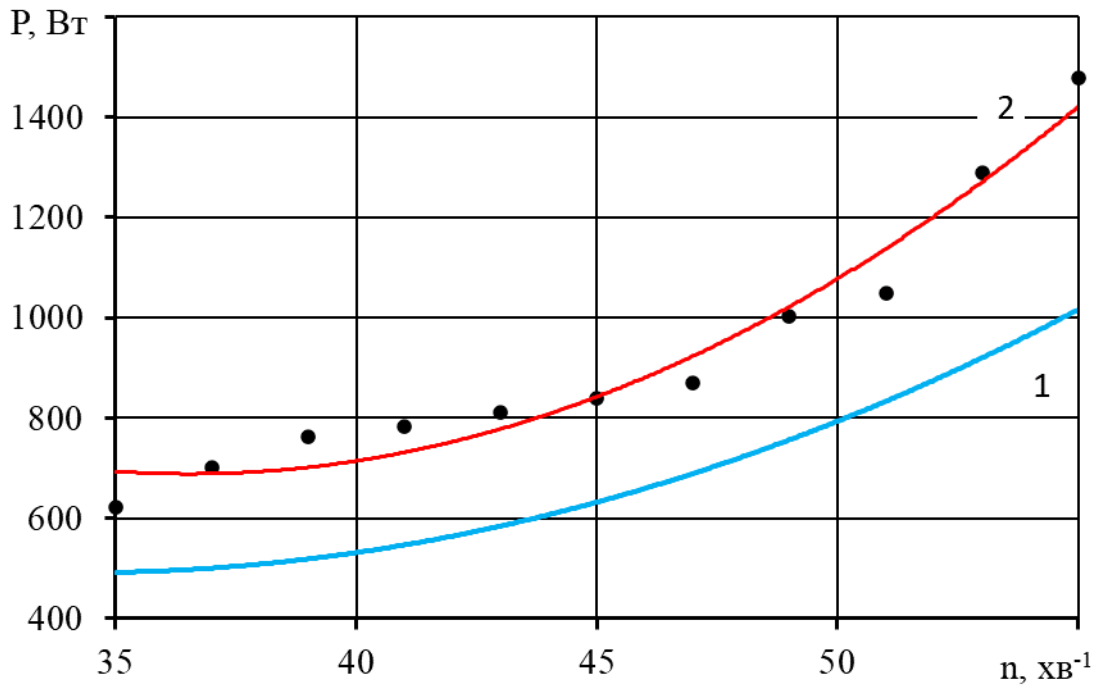


Рисунок 4.5 – Потужність на привід: 1 – теоретичні дані; 2 – експериментальні дані

Для практичного використання модель може бути скоригована поправочним коефіцієнтом $k_p = 1{,}32$, що враховує вплив технологічних відхилень.

При збільшенні *n* від 30 до 50 хв$^{-1}$ потужність P зростає майже в 1,7 раза. Однак зменшення швидкості для зниження споживаної потужності не завжди доцільне - через зростання тривалості змішування та зниження продуктивності.

Для комплексної оцінки ефективності процесу враховано енерговитрати за один цикл змішування. Виходячи з попередніх результатів, розроблено рівняння питомої енергоємності E як функції частоти *n* з урахуванням коефіцієнта *k* (що відповідає оптимальній інтенсивності змішування):

$$E=f(n,k) \tag{3.7}$$

Графічна інтерпретація (рис. 3.7) свідчить, що функція E(n) має чітко виражений мінімум при $n = 40{,}5$ *хв*$^{-1}$, де питомі енерговитрати становлять ≈ 2,25 кВт·год/цикл.

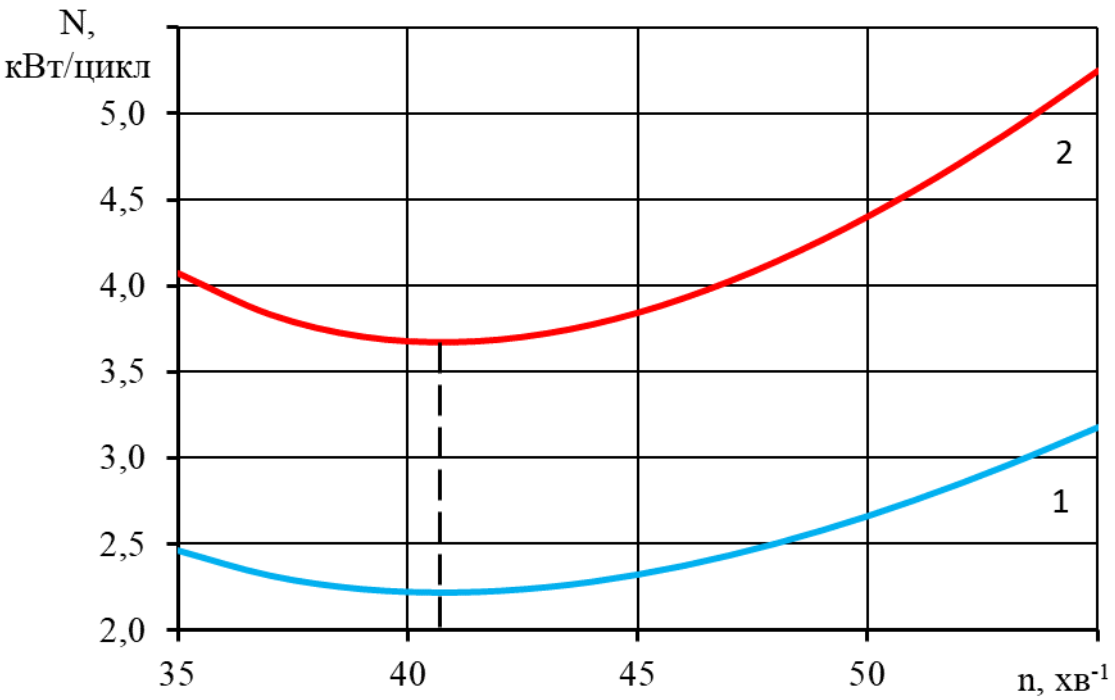


Рисунок 3.7 – Залежність питомої енергоємності при: 1 – k=min; 2 – k=max

При нижчих швидкостях зростає час змішування, а при вищих - зростає споживана потужність, тому крива має U-подібну форму.

Висновок: оптимальний режим змішування досягається при $n = 40–42$ $хв^{-1}$, коли забезпечується мінімум енергоспоживання без втрати якості процесу.

Для визначення тривалості процесу залежно від складу суміші (вмісту мінімального компоненту g) використано комбінацію рівнянь (3.6) та (3.7):

$$t=f(g) \tag{3.8}$$

Графік (рис. 3.7) демонструє нелінійну залежність часу змішування від g.

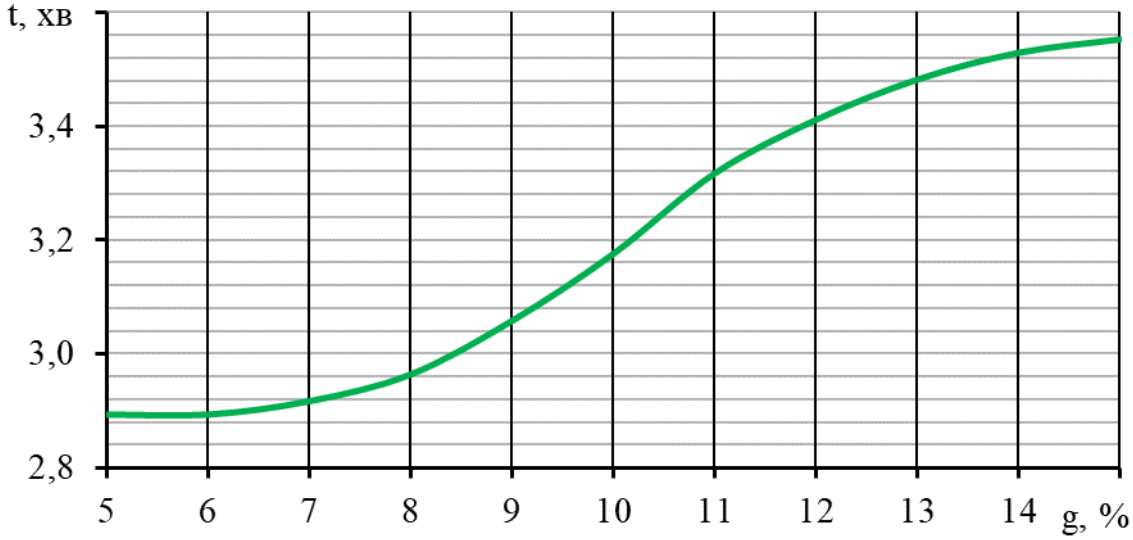


Рисунок 3.7 – Графік для підбору часу змішування

При $g = 8–11$ % спостерігається різке зростання t через зниження швидкості конвекційного перемішування та недостатню дію дифузійного механізму.

За межами цього діапазону процес стабілізується - швидкість дифузійного переміщення частинок компенсує зменшення конвекційних потоків.

Оптимальний діапазон вмісту мінімального компоненту для швидкого та якісного змішування - $g = 9–12\ \%$, при якому час змішування мінімальний і відповідає максимальній однорідності.

3.5 Висновки

У результаті проведених експериментальних досліджень процесу змішування сипких кормів за допомогою дослідного змішувача отримано такі результати:

- Із підвищенням часу та частоти обертання ступінь однорідності суміші зростає, досягаючи максимуму 97,8 % при $n = 48\ хв^{-1}$ і $t = 3,2\ хв$, після чого спостерігається незначне зниження показника через надмірну інтенсивність руху матеріалу.
- Характер змішування відповідає типовій кінетиці для сипких матеріалів: на початку процесу переважає конвективна фаза, далі - дифузійна, а на завершальному етапі - сегрегаційна.
- Потужність приводу, виміряна експериментально, повторює тенденції, встановлені теоретичними розрахунками; відмінність становить 28…35 %, при цьому коефіцієнт кореляції дорівнює 0,97, що підтверджує високу точність моделі.
- Енергетичні витрати мають нелінійний характер: мінімальне значення спостерігається не при найменшій частоті, а при $n = 40,5\ хв^{-1}$, де енерговитрати складають 2,25 кВт·цикл$^{-1}$, тоді як максимальні - 3,66 кВт·цикл$^{-1}$.
- Тривалість змішування залежить від вмісту дрібнодисперсного компонента та змінюється в межах 2,9…3,56 хв.
- На підставі отриманих даних визначено раціональні конструктивно-технологічні параметри змішувача, що забезпечують оптимальне поєднання енергетичної ефективності та високої якості змішування.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Загальні вимоги охорони праці на комбікормових підприємствах

На комбікормових підприємствах охорона праці спрямована на забезпечення безпеки працівників, запобігання виробничому травматизму та створення здорових умов праці під час виконання технологічних процесів переробки, зберігання та транспортування сировини і готової продукції. Виробничі приміщення мають бути оснащені справними системами вентиляції, освітлення та пилопригнічення, що забезпечують нормований мікроклімат і мінімізацію пилових концентрацій у повітрі робочої зони. До обслуговування обладнання допускаються працівники, які пройшли навчання, інструктаж та медичний огляд, володіють навичками безпечного обслуговування машин і механізмів.

Особливу увагу приділяють роботі з обладнанням із підвищеною небезпекою - дробарками, змішувачами, транспортерними системами, аспіраційними установками. Усі рухомі частини обладнання, що становлять ризик контакту, повинні мати надійні огородження, блокування та заземлення. Технічне обслуговування, очищення та ремонт допускаються лише після повного зупинення та відключення енергоживлення. Робочі місця необхідно підтримувати у чистоті, регулярно видаляючи розсипані сипкі матеріали, щоб запобігти ковзанню та вторинному пиловиділенню.

Працівники зобов’язані використовувати засоби індивідуального захисту відповідно до умов праці: захисний одяг, рукавиці, респіратори або маски, захисні окуляри та засоби захисту слуху. Забезпечується контроль за вмістом органічного пилу та шкідливих газів у повітрі, оскільки пил комбікормів може спричиняти алергічні реакції, хвороби органів дихання та підвищувати ризик пилових вибухів. Тому забороняється застосування відкритого вогню й іскроутворювальних інструментів у вибухонебезпечних зонах.

Організація виробничого процесу має передбачати зручні та безпечні маршрути переміщення людей і транспорту, наявність охайних проходів і доступу до засобів пожежогасіння. Працівники повинні бути ознайомлені з правилами поведінки при аваріях, пожежах, раптово небезпечних ситуаціях та вміти користуватися первинними засобами пожежогасіння. Роботодавець забезпечує періодичний контроль стану охорони праці, проведення профілактичних оглядів обладнання, а також надання працівникам інструктажів і навчання.

Таким чином, дотримання загальних вимог охорони праці на комбікормових підприємствах є ключовою умовою запобігання травматизму і професійним захворюванням, сприяє підвищенню ефективності та надійності виробництва, створює безпечне й комфортне середовище для всіх учасників технологічного процесу.

4.2 Небезпечні та шкідливі виробничі фактори на комбікормових підприємствах

У процесі виробництва комбікормів працівники піддаються дії комплексу небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що зумовлені механічним, технологічним, пиловим та шумовим навантаженням. Найбільш суттєвим є вплив органічного пилу, який утворюється під час дроблення, транспортування і змішування сировини. Концентрація пилу може перевищувати гранично допустимі рівні, що призводить до подразнення слизових оболонок, алергічних реакцій, хронічних захворювань дихальної системи, а також створює ризик пилового вибуху у вибухонебезпечних зонах.

До небезпечних факторів належать рухомі частини машин і механізмів: валки, робочі органи дробарок, шнеки, транспортери, змішувачі. Відкритий доступ до них створює високу ймовірність травмування - затягування одягу, травм рук, кінцівок. Порушення правил обслуговування може призвести до

аварійного відмовлення обладнання та викиду матеріалу. Підвищений рівень шуму від приводів, вентиляторів, транспортерів та аспіраційних систем сприяє розвитку порушень слуху та зниженню працездатності персоналу.

Шкідливими факторами є несприятливий мікроклімат (перепади температури, висока вологість, недостатня вентиляція), що може спричиняти теплові перевантаження, застудні та дерматологічні захворювання. Основними джерелами тепловиділення є двигуни, редуктори, обладнання для гранулювання або сушки. Електрична небезпека пов’язана з наявністю великої кількості електроприймачів та високою ймовірністю ушкодження ізоляції в умовах пилового середовища. Особливо небезпечними є короткі замикання, які на фоні високої запиленості можуть спричинити займання.

До додаткових факторів ризику належать: ручне перенесення важких вантажів (мішки із сировиною або готовою продукцією), пересування по слизьких або запилених поверхнях, недостатня освітленість робочої зони, психофізіологічні навантаження при монотонних та тривалих операціях. Відхилення від технологічних режимів, а також порушення правил безпечної роботи персоналом посилюють небезпеку виникнення травматизму.

З огляду на вищевикладене на комбікормових підприємствах необхідно впроваджувати комплексні заходи профілактики, спрямовані на усунення або зниження впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів до нормативно безпечних рівнів, а також постійно контролювати технічний стан обладнання, дотримання регламентів роботи та застосування працівниками засобів індивідуального захисту.

4.3 Оцінка виробничих ризиків при експлуатації лінії змішування комбікормів

У процесі експлуатації обладнання для змішування комбікормів працівники піддаються впливу комплексу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які можуть спричинити травматизм, професійні

захворювання та аварійні ситуації. До найбільш поширених факторів відносять пил органічного походження, підвищений рівень шуму, дію рухомих частин машин, електричну небезпеку, а також несприятливий мікроклімат у виробничих приміщеннях. Для своєчасного виявлення й нейтралізації таких факторів застосовують ризик-орієнтований підхід, рекомендований міжнародним стандартом ISO 45001:2018.

Таблиця 4.1 - Оцінка виробничих ризиків при експлуатації лінії змішування комбікормів

№	Небезпечний / шкідливий фактор	Джерело ризику	Можливі наслідки	Ймовірність (P)	Тяжкість (S)	Рівень ризику (R=P× S)	Заходи мінімізації
1	Органічний пил	Дробарки, змішувачі, транспортери	Алергії, бронхолегеневі захворювання, пиловий вибух	4	5	20 – високий	Аспірація, герметизація, респіратори, контроль ПДК
2	Рухомі частини машин	Робочі органи змішувача, приводи	Травмування кінцівок, затягування одягу	3	5	15 – високий	Огородження, блокування пуску, інструктаж
3	Електричний струм	Електроприводи, кабелі	Ураження струмом, займання	3	5	15 – високий	Заземлення, УЗО, контроль ізоляції
4	Підвищений шум	Вентилятори, редуктори, двигуни	Зниження слуху, стрес	4	3	12 – середній	Навушники, технічне обслуговування
5	Слизькі та запилені поверхні	Розсипання матеріалів	Падіння, забої, переломи	4	3	12 – середній	Прибирання, протиковзкі покриття

Оцінка ризиків дозволяє визначити найбільш критичні види небезпек і встановити пріоритетність заходів щодо їх усунення або зниження до прийнятного рівня. У таблиці наведено основні фактори ризику, пов’язані з роботою змішувача комбікормів і супутнього обладнання, а також визначено

їх рівень шляхом множення показників ймовірності виникнення (P) і тяжкості наслідків (S).

Таким чином, найбільш високі ризики пов’язані з пиловою небезпекою, рухомими частинами обладнання та електробезпекою. Для забезпечення безпечних умов праці необхідно впроваджувати технічні, організаційні й індивідуальні засоби захисту, а також здійснювати систематичний контроль ефективності заходів охорони праці відповідно до вимог ISO 45001:2018.

4.4 Висновки

У розділі охорони праці проаналізовано умови праці на комбікормовому підприємстві та визначено основні небезпечні й шкідливі фактори, що виникають під час експлуатації обладнання для змішування комбікормів. Встановлено, що найвищі рівні ризику пов’язані з дією органічного пилу, рухомих частин машин, а також електричною та пожежовибуховою небезпекою.

Запропоновані технічні, організаційні й індивідуальні заходи захисту забезпечують зниження ризиків до прийнятного рівня та сприяють створенню безпечних і комфортних умов праці для персоналу. Дотримання вимог охорони праці є необхідною умовою ефективного та безпечного функціонування комбікормового виробництва.

5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗМІШУВАЧА КОМБІКОРМІВ

5.1 Вихідні дані

Економічна ефективність впровадження удосконаленого змішувача сипких комбікормів оцінюється шляхом порівняння з найбільш близьким за технічними параметрами серійним зразком. У якості базового обладнання обрано змішувач ЗСК-1,2, який забезпечує порівнянну продуктивність та показник однорідності змішування не нижче 96 %. Порівняння здійснюється за питомими експлуатаційними витратами (грн/т), що дає змогу об’єктивно оцінити економічну доцільність впровадження нового обладнання незалежно від планового обсягу випуску продукції. Розрахунки виконано для умов однозмінної роботи підприємства із тривалістю зміни 8 годин.

До складу вихідних даних для техніко-економічного аналізу включено продуктивність змішувачів, споживану потужність, чисельність обслуговуючого персоналу, нормативний строк служби, а також питомі коефіцієнти амортизації та витрат на технічне обслуговування. Окремо враховано вартість базового змішувача та необхідні капітальні інвестиції у разі впровадження проєктованої конструкції

5.2 Розрахунок показників економічної ефективності

Для оцінювання економічних переваг удосконаленого змішувача розраховано питомі приведені та річні експлуатаційні витрати. До їх складу включено витрати на оплату праці, енергоспоживання, амортизаційні відрахування та витрати на технічне обслуговування і ремонт обладнання. Методика визначення показників приведена з урахуванням галузевих нормативів [26].

Отримані результати свідчать, що розроблений змішувач забезпечує зростання продуктивності на 8,3 % порівняно з базовим обладнанням. Найбільший внесок в економічну перевагу становить суттєве зменшення енергоспоживання - у 4,1 рази у розрахунку на тонну змішаного корму (24,6 % від витрат базового варіанта). Зниження питомих експлуатаційних витрат на 11 % та приведених витрат на 10,6 % свідчить про високу енергоощадність та економічність запропонованої конструкції.

Оскільки впровадження удосконаленого змішувача потребує капітальних вкладень у розмірі 12 300 грн, додатково розраховано строк окупності й річний економічний ефект. При 100% завантаженні технологічної лінії економічний ефект складає 9238,7 грн на рік, що дозволяє забезпечити повне повернення інвестицій за 1,3 року. Це свідчить про високу інвестиційну привабливість запропонованого технічного рішення.

5.3 Висновки

Проведений техніко-економічний аналіз підтвердив доцільність упровадження розробленого змішувача сипких комбікормів у виробництво. Удосконалена конструкція забезпечує підвищення продуктивності обладнання, суттєве зменшення споживаної потужності та зниження експлуатаційних витрат порівняно із серійним змішувачем ЗСК-1,2. Річний економічний ефект при роботі в однозмінному режимі становить 9238,7 грн, що дозволяє окупити витрати на придбання та впровадження обладнання протягом 1,3 року. Отже, використання розробленого змішувача є економічно обґрунтованим і може сприяти підвищенню ефективності виробництва комбікормових підприємств.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломній роботі виконано дослідження та удосконалення конструкції змішувача сипких комбікормів з метою підвищення ефективності змішування та зниження енергетичних витрат технологічного процесу. За результатами виконаної роботи отримано такі основні науково-технічні результати:

1. Проведено аналіз сучасних технічних засобів для змішування сипких кормів та встановлено, що найбільш перспективними для виробництва комбікормів є горизонтальні стрічкові змішувачі завдяки їх високій рівномірності змішування та конструктивній простоті.

2. Обґрунтовано конструктивно-технологічні параметри змішувача з комбінованим ленточним шнеком, що забезпечує інтенсивне переміщення матеріалу в центральній зоні робочої камери та усуває застійні ділянки. Розроблене технічне рішення дозволяє підвищити якість змішування до 97,8 %.

3. Проведено теоретичні дослідження взаємодії сипкого матеріалу з робочими органами змішувача. Розроблено математичну модель визначення необхідних енергетичних параметрів з урахуванням впливу частоти обертання та геометрії шнеків. На основі моделі встановлено раціональні конструктивні параметри: крок внутрішнього шнека 240 мм, потужність приводу 11,5 кВт.

4. На лабораторному стенді проведено експериментальні дослідження, які підтвердили адекватність теоретичних положень. Коефіцієнт кореляції між теоретичними й експериментальними даними склав 0,97, що свідчить про високу достовірність розрахунків.

5. Результати вимірювань показали, що енергетичні витрати мають нелінійний характер, а економічно доцільний режим досягається при частоті обертання 40,5 хв$^{-1}$. Тривалість змішування для отримання однорідної суміші складає 2,9–3,56 хв залежно від фракційного складу.

6. Проведено техніко-економічну оцінку удосконаленого змішувача. Встановлено, що питомі експлуатаційні витрати знижуються на 11 %, а річний економічний ефект впровадження при роботі в однозмінному режимі становить 9238,7 грн. Строк окупності капітальних вкладень - 1,3 роки, що підтверджує високу ефективність запропонованого технічного рішення.

7. Розроблено заходи з охорони праці, спрямовані на мінімізацію ризиків, пов’язаних із пиловою небезпекою, дією рухомих частин, шумовим та електротехнічним впливом. Дотримання цих вимог забезпечує безпечну експлуатацію змішувача та відповідність чинним нормативам.

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. 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.

4. 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 ConferenceConduct of modern science - 2018 , November 30 - December 7, 2018. Construction and architecture. Agriculture. Modern information technology.: Sheffield. Science and education LTD – 41-45 p.

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

6. Dahan Mixing & Blending Equipment. (n.d.). Double Shaft Paddle Mixer. Retrieved from https://www.dahanmachine.com/product-center/Double-Shaft-Paddle-Mixer.html

7. Dahan Mixer Machinery Co., Ltd. (n.d.). Mixer Equipment - Product Center. Retrieved from https://www.dahanmixer.com/product-center/

8. Jiangsu Muyang Group Co., Ltd. (n.d.). Paddle Mixer & Mixing Machine & Double Shaft & Feed Mixer. Retrieved from https://muyanggroup.en.ec21.com/Paddle_Mixer_%26_Mixing_Machine_%26_Double_Shaft_%26_Feed_Mixer--6580567_6585017.html

9. Jiangsu Muyang Group Co., Ltd. (n.d.). Paddle Mixing Machine. Retrieved from https://www.tradeindia.com/products/paddle-mixing-machine-1130758.html

10. Muyang. (n.d.). Mixing Technology – Coefficient of Variation etc. Retrieved from https://www.scribd.com/document/324765698/Muyang-Mixing-Technology

11. Rocha, A. G., … (2015). Comparison of different indicators for the evaluation of feed mixing efficiency, using a horizontal paddle mixer with single axis. Animal Feed Science and Technology.

12. Chernovol, M., Sviren, M., Kisiliov, R. (2018). Study of the process of preparing feeding mixtures using the composite mixer. Agricultural Science and Practice, 5(1), 18-20.

13. Adusei-Bonsu, M. et al. (2021). Performance evaluation of mechanical feed mixers using … Journal of Materials Processing Technology / ….

14. Iskakov, R., & Gulyarenko, A. (2025). Grinding and Mixing Uniformity in a Feed Preparation Device with Four-Sided Jagged Hammers … AgriEngineering, 7(6), 183.

15. Xu, H. et al. (2025). The Influence and Optimization of Mixing Characteristics in Feed Mixer Design. Processes, 13(10), 3101.

16. Suarbawa, I. K. G. J. et al. (2023). Design of Chicken Feed Mixer Machine Model to Increase … Proceedings of the 19th International Conference on Mechanical Engineering.

17. Ardian, A., Wikantara, A. A., Aditya, Z. A., Kusdiyarto, P. (2024). Performance analysis of the fabricated animal feed mixer machine. Journal of Engineering and Applied Technology, 5(2), 85-93.

18. Analysis of feed mixer efficiencies of commercial feed manufacturers in the Philippines from 2012 to 2016. (2020). ResearchGate Preprint.

19. “Batching and Mixing” – Quality Feed Manufacturing Guide (2021). Kansas State University.

20. “Testing Mixer Performance” – KSRE MF3393 (2016). Kansas State University Research & Extension.

21. International Organization for Standardization. (2018). Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use (ISO Standard No. 45001:2018). https://www.iso.org/standard/63787.html

22. Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут стандартизації». (2014). ДСТУ 2293:2014 Охорона праці. Терміни та визначення.
https://education.profiteh.kiev.ua/pluginfile.php/267/mod_page/content/

23. Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут стандартизації». (2019). ДСТУ 8844:2019 Корми, комбікорми, комбікормова сировина. Методи визначення сирої клітковини. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82156

24. International Organization for Standardization. (2010). ISO 12100: Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction. https://www.iso.org/standard/51528.html

25. Державна служба України з питань праці. (2017). НПАОП 15.0-1.01-17 Правила охорони праці для працівників, зайнятих на роботах із зерном та комбікормами.
http://education.profiteh.kiev.ua/pluginfile.php/267/mod_page/content/12-pdf

ДОДАТКИ

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра інжинірингу технічних систем

Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів змішувача комбікорму

демонстраційний матеріал до дипломної роботи освітнього ступеня «Магістр»

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІ-3-24
Антіпов Артур Євгенович

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

Дніпро 2025

МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності процесу приготування комбікормів шляхом обґрунтування параметрів змішувача.

Задачі досліджень:

- Провести аналіз існуючих конструкцій змішувачів комбікормів і визначити їхні переваги та недоліки.
- Обґрунтувати вибір типу змішувача та принципу його роботи.
- Розробити теоретичну модель процесу змішування сипких компонентів.
- Визначити оптимальні конструкційно-технологічні параметри змішувача.
- Розробити програму та методику експериментальних досліджень і провести аналіз отриманих результатів.
- Розглянути питання охорони праці під час експлуатації змішувального обладнання.
- Виконати оцінку енергетичної ефективності та економічну доцільність застосування запропонованої конструкції.

Об’єкт дослідження - процес змішування інгредієнтів комбікормів.

Предмет дослідження – закономірності взаємозв'язку технологічних і конструкційних параметрів змішувача інгредієнтів комбікормів.

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ

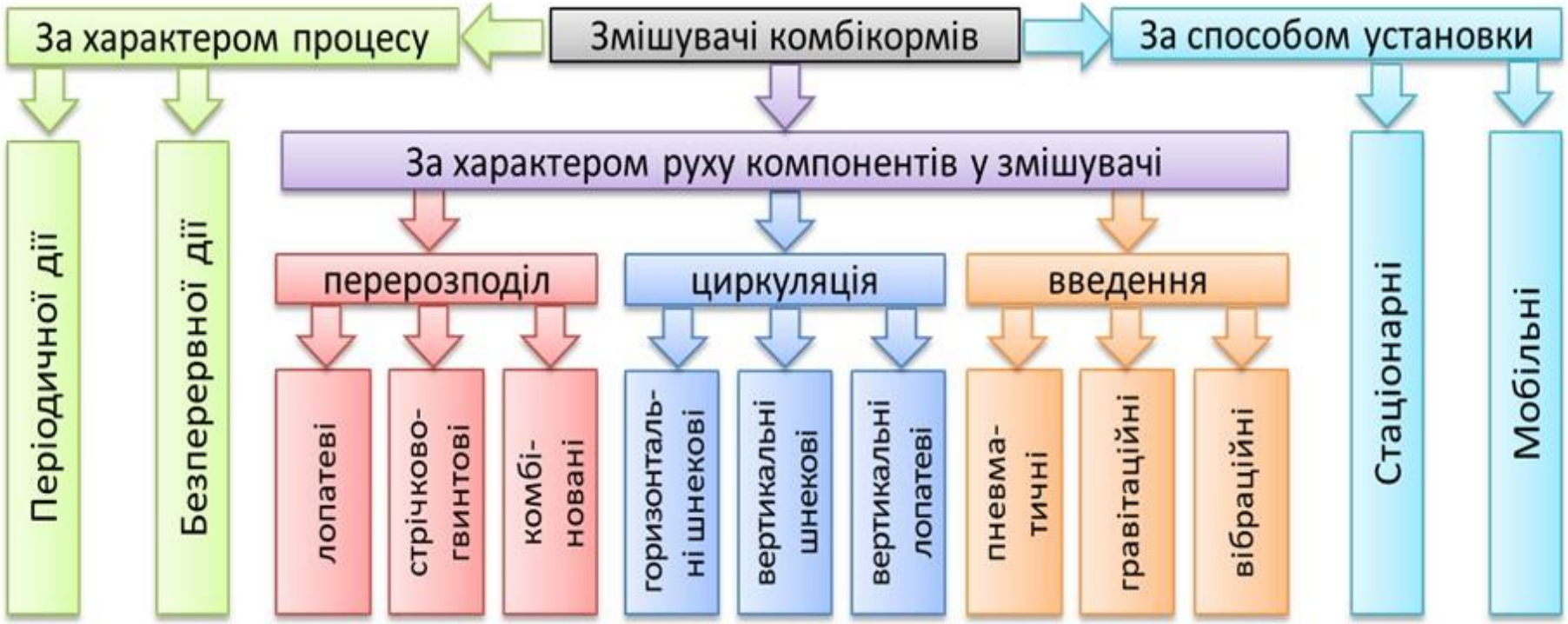
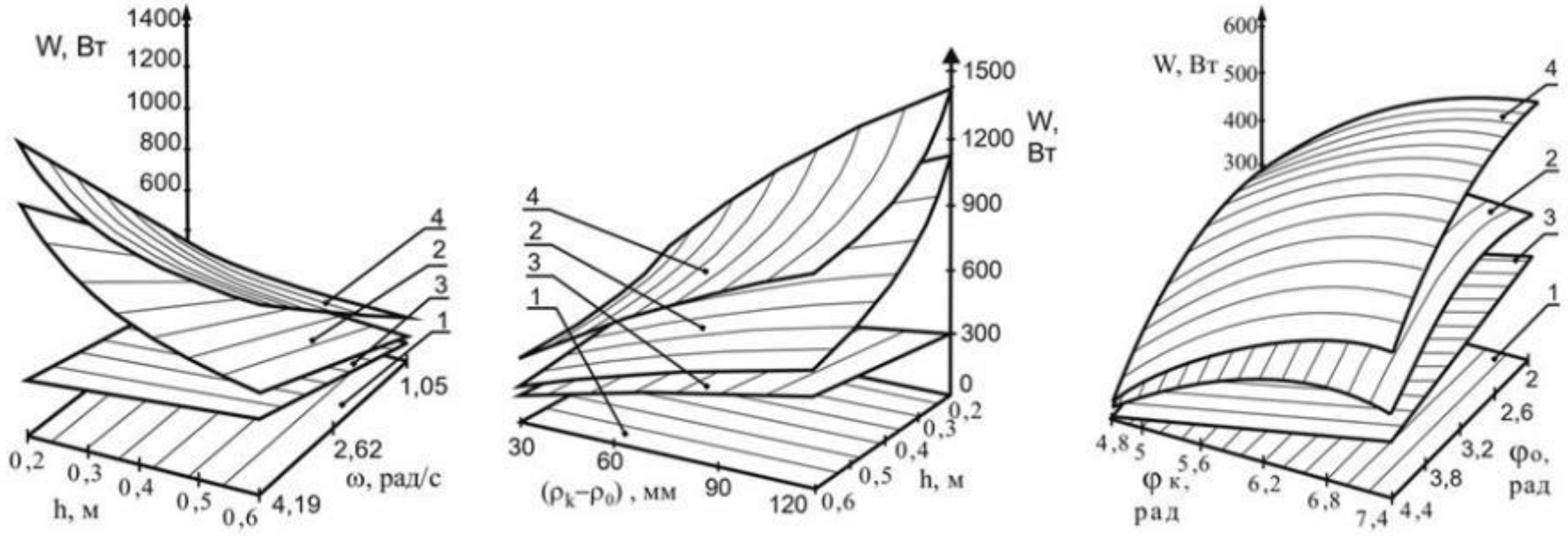


Рисунок 2– Класифікація змішувачів комбікормів

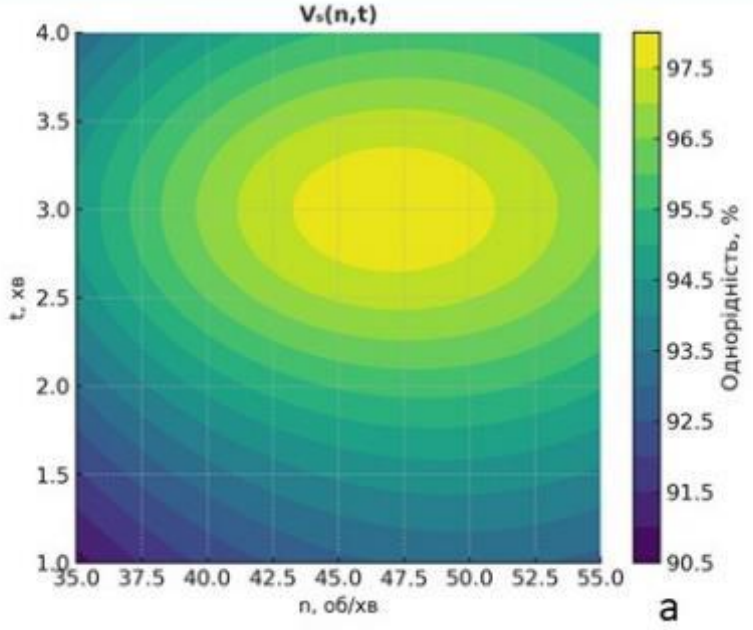
ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

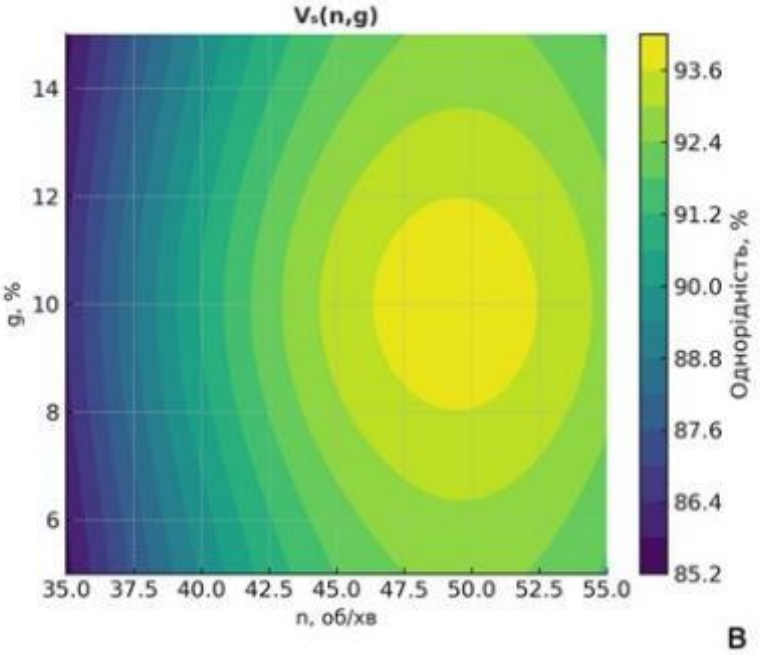


а б в

Рисунок 6 –Теоретична залежність потужності від: а - частоти обертання вала ω і кроку витка стрічки h; б - ширини стрічки шнека і його кроку h; в - ступеня завантаження змішувача: 1 – $W_{хх}$; 2 – $W_{тер}$; 3 – $W_{пер}$; 4 – сумарна поверхня за всіма трьома складниками

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ





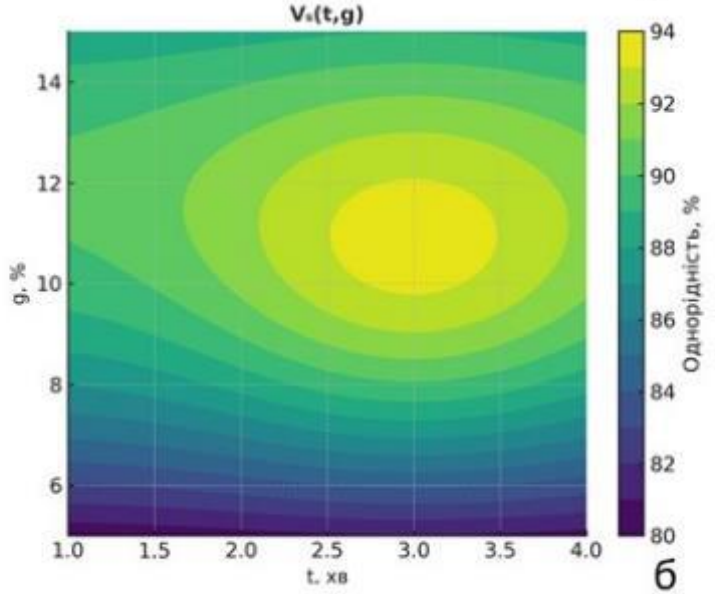


Рисунок 10 – Залежність однорідності змішування від: а - часу змішування та частоти обертання робочого органу; б - часу змішування та вмісту мінімального компоненту; в - від частоти обертання робочого органу та вмісту мінімального компоненту

9

ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

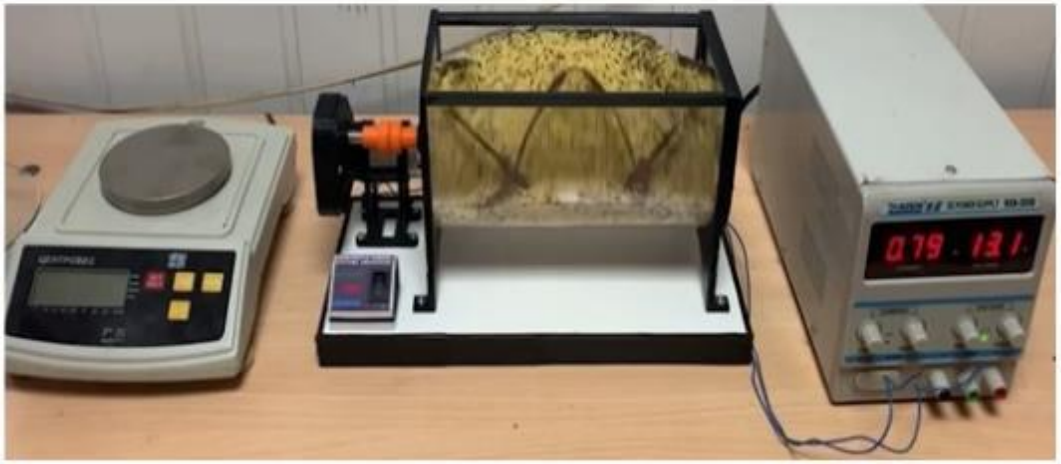
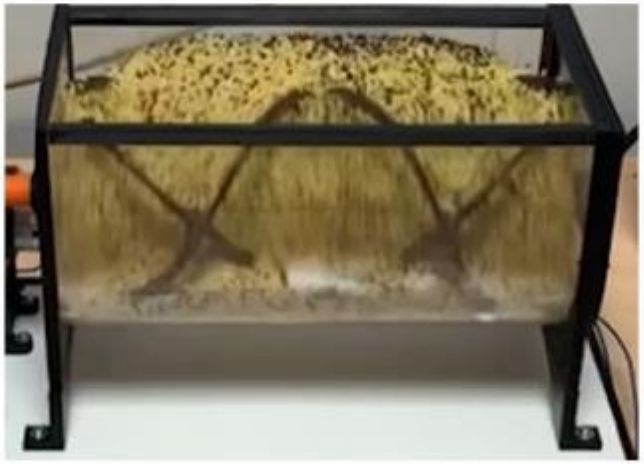


Рисунок 7 – Загальний вигляд експериментальної установки

Рисунок 9 – Відбір проб

Факторами експерименту були обрані частота обертання валу мішалки n, хв$^{-1}$ (x_1), час змішування t, хв. (x_2) і вміст мінімального компоненту g, % (x_3).

Критеріями оптимізації є питома енергоємність процесу змішування q, Вт-год/кг та вміст однорідність суміші μ, %.



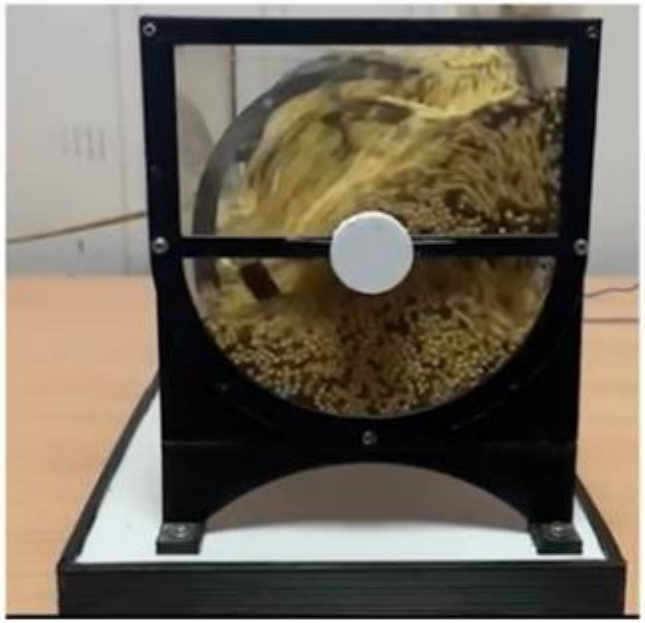


Рисунок 8 – Процес змішування

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

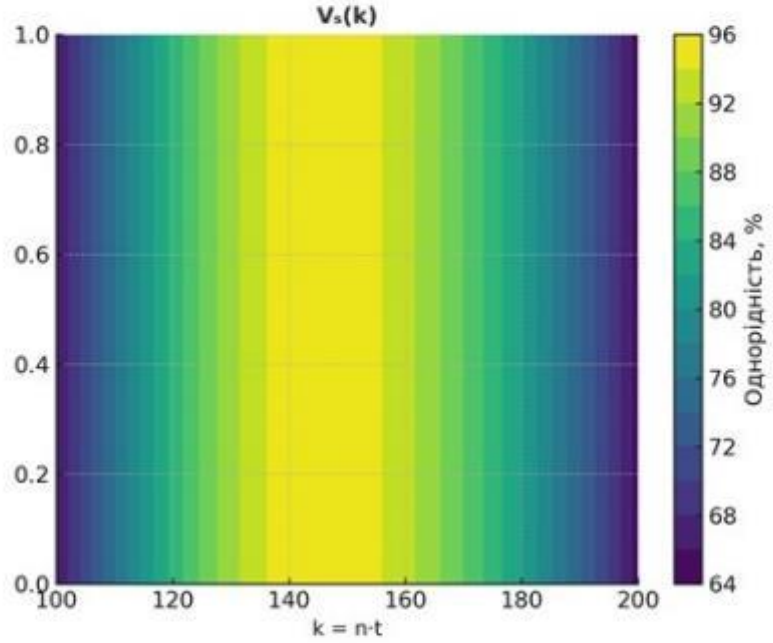


Рисунок 11 – Залежність однорідності змішування від режимного показника при різному вмісті мінімального компоненту

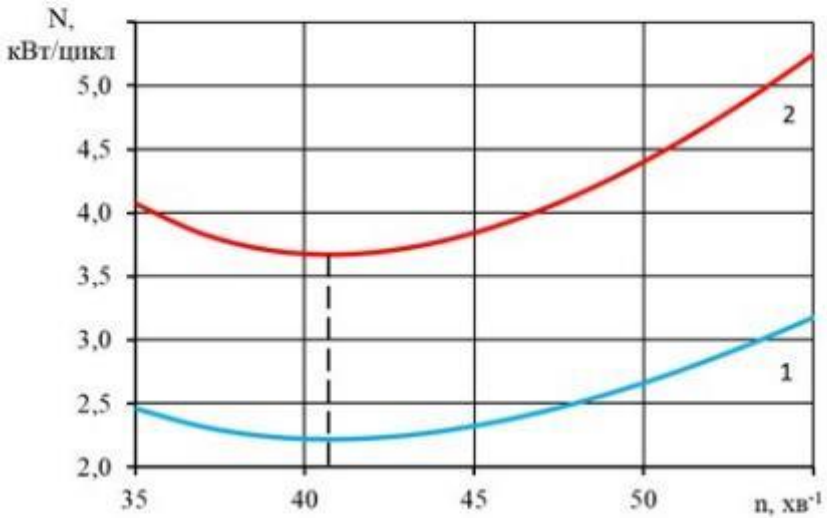


Рисунок 12 – Залежність питомої енергоємності від частоти обертання робочого органу змішувача: 1 – мінімальна інтенсивність – k=min; 2 –мінімальна інтенсивність – k=max

Показник	Значення
Об’єм бункера, м^3	0,4
Діаметр спіралі, м (зовнішній/внутрішній)	0,8/0,7
Довжина бункера, м	1,5
Мінімальне введення компонента, %	5
Час змішування, хв.	2,9…3,7
Частота обертання вала змішувача, хв$^{-1}$	41…42
Споживана потужність, кВт	2,2

Таблиця 3 — Оцінка виробничих ризиків при експлуатації лінії змішування комбікормів

№	Небезпечний / шкідливий фактор	Джерело ризику	Можливі наслідки	Ймовірність (P)	Тяжкість (S)	Рівень ризику (R=P×S)	Заходи мінімізації
1	Органічний пил	Дробарки, змішувачі, транспортери	Алергії, бронхолегеневі захворювання, пиловий вибух	4	5	20 – високий	Аспірація, герметизація, респіратори, контроль ПДК
2	Рухомі частини машин	Робочі органи змішувача, приводи	Травмування кінцівок, затягування одягу	3	5	15 – високий	Огородження, блокування пуску, інструктаж
3	Електричний струм	Електроприводи, кабелі	Ураження струмом, займання	3	5	15 – високий	Заземлення, УЗО, контроль ізоляції
4	Підвищений шум	Вентилятори, редуктори, двигуни	Зниження слуху, стрес	4	3	12 – середній	Навушники, технічне обслуговування
5	Слизькі та запилені поверхні	Розсипання матеріалів	Падіння, забої, переломи	4	3	12 – середній	Прибирання, протиковзкі покриття

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РОЗРОБЛЕНОГО ЗМІШУВАЧА

Показники	Варіанти		Проектований у % до базового
	ЗСК-1,2	розроблений змішувач	
Продуктивність, т/год.	1,2	1,3	108,3
Обслуговуючий персонал, люд.	1	1	100
Балансова вартість, грн.	11000	-	-
Капітальні вкладення, грн.	-	12300	-
Питомі приведені витрати, грн./т	32,93	29,45	89,4
Питомі річні експлуатаційні витрати, грн./т	32,31	28,76	89
в т.ч.: заробітна платня	25,94		92,3
витрати на електроенергію	2,1	0,51	24,6
амортизаційні відрахування	2,8	2,89	103,2
витрати на ТО та ремонт	0,46	0,48	104,3
Строк окупності капітальних вкладень, років	-	1,3	-
Річний економічний ефект, грн.	-	9238,7	-

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз сучасних технічних засобів для змішування сипких кормів та встановлено, що найбільш перспективними для виробництва комбікормів є горизонтальні стрічкові змішувачі завдяки їх високій рівномірності змішування та конструктивній простоті.

2. Обґрунтовано конструктивно-технологічні параметри змішувача з комбінованим стрічковим шнеком, що забезпечує інтенсивне переміщення матеріалу в центральній зоні робочої камери та усуває застійні ділянки. Розроблене технічне рішення дозволяє підвищити якість змішування до 97,8 %.

3. Проведено теоретичні дослідження взаємодії сипкого матеріалу з робочими органами змішувача. Розроблено математичну модель визначення необхідних енергетичних параметрів з урахуванням впливу частоти обертання та геометрії шнеків. На основі моделі встановлено раціональні конструктивні параметри: крок внутрішнього шнека 240 мм, потужність приводу 11,5 кВт.

4. На лабораторному стенді проведено експериментальні дослідження, які підтвердили адекватність теоретичних положень. Коефіцієнт кореляції між теоретичними й експериментальними даними склав 0,97, що свідчить про високу достовірність розрахунків.

5. Результати вимірювань показали, що енергетичні витрати мають нелінійний характер, а економічно доцільний режим досягається при частоті обертання 40,5 $хв^{-1}$. Тривалість змішування для отримання однорідної суміші складає 2,9–3,56 хв залежно від фракційного складу.

6. Проведено техніко-економічну оцінку удосконаленого змішувача. Встановлено, що питомі експлуатаційні витрати знижуються на 11 %, а річний економічний ефект впровадження при роботі в однозмінному режимі становить 9238,7 грн. Строк окупності капітальних вкладень — 1,3 роки, що підтверджує високу ефективність запропонованого технічного рішення.

7. Розроблено заходи з охорони праці, спрямовані на мінімізацію ризиків, пов'язаних із пиловою небезпекою, дією рухомих частин, шумовим та електротехнічним впливом. Дотримання цих вимог забезпечує безпечну експлуатацію змішувача та відповідність чинним нормативам.