

ДНПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем

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

**Підвищення ефективності процесу
приготування комбікормів**

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

_____ Ренгус Володимир Володимирович

Керівник: _____ Білоус Ілля Михайлович

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**

Ренгусу Володимиру Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення ефективності процесу приготування комбікормів

керівник роботи: Білоус Ілля Михайлович, доктор філософії

(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 комбікормів. Патентний пошук, аналіз літературних джерел, останніх досліджень з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз стану питання. 2. Теоретичне обґрунтування параметрів змішувача. 3. Експериментальні дослідження змішувача. 4. Охорона праці. 5. Техніко-економічна оцінка. Загальні висновки. Бібліографічний список

5. Перелік демонстраційного матеріалу

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1-5	Білоус І.М., ст. викл.		
Нормоконтроль	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

_____ (підпис)

Ренгус В.В.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Білоус І.М.

_____ (прізвище та ініціали)

Ренгус В.В. Підвищення ефективності процесу приготування комбікормів /Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2025.

У роботі розглянуто підвищення ефективності приготування сипких комбікормів шляхом удосконалення змішувача. Проаналізовано існуючі конструкції змішувачів і показано їхні обмеження щодо однорідності суміші та енергоємності. Обґрунтовано конструкцію лопатевого змішувача з конічною змішувальною камерою та розроблено теоретичні залежності для оцінки енергетичних показників процесу. На основі багатофакторного експерименту отримано регресійні моделі впливу окружної швидкості, часу змішування та кута встановлення лопаті на якість суміші та питомі енерговитрати, визначено оптимальні режими роботи змішувача. Проведено оцінку безпеки експлуатації та техніко-економічний аналіз, який підтвердив зниження питомих експлуатаційних витрат і швидко окупність упровадження розробленого змішувача в умовах тваринницького підприємства.

Ключові слова: змішувач комбікормів, лопатевий змішувач, сипкі корми, однорідність суміші, питома енергоємність змішування, фізико-механічні властивості комбікормів, багатофакторний експеримент, оптимізація режимів роботи.

ЗМІСТ

Вступ	8
1 Аналіз стану питання	10
1.1 Аналіз технічних засобів для змішування комбікормів	10
1.2 Методи відбору проб для оцінки якості змішування	23
1.3 Методи оцінки якості змішування	24
1.4 Висновки	27
2 Теоретичне обґрунтування параметрів змішувача	29
2.1 Передумови до розроблення змішувача комбікормів	29
2.2 Визначення параметрів змішувача комбікормів	32
2.3 Визначення енергетичних показників процесу	39
2.4 Висновки	46
3 Експериментальні дослідження змішувача	48
3.1 Загальні положення	48
3.2 Методика визначення раціональних параметрів змішувача	50
3.3 Результати досліджень	53
3.4 Висновки	57
4 Охорона праці	58
4.1 Загальні вимоги охорони праці при приготуванні комбікормів	58
4.2 Оцінка з точки зору охорони праці розробленого змішувача	59
4.3 Проект інструкції з охорони праці оператора змішувача	60
4.4 Висновки	63
5 Техніко-економічна оцінка	65
5.1 Вихідні дані для розрахунків	65
5.2 Результати розрахунків	66

5.3 Висновки	68
Загальні висновки	69
Бібліографія	70
Додатки	72

ВСТУП

Сучасний розвиток тваринництва неможливий без повноцінної та збалансованої годівлі, яка є одним з головних факторів підвищення продуктивності великої рогатої худоби, поліпшення збереженості поголів'я та якості продукції. У структурі раціонів провідне місце займають комбікорми та суміші з включенням мінерально-вітамінних і білково-мінеральних добавок, частка яких у загальній масі корму часто є незначною, але саме вони визначають рівень протеїнового, мінерального й вітамінного забезпечення тварин. Тому однією з ключових вимог до технології приготування комбікормів є забезпечення високої однорідності розподілу цих компонентів у масі кормосуміші.

На практиці змішування компонентів комбікормів на тваринницьких підприємствах здійснюють переважно в обладнанні, запозиченому з суміжних галузей – харчової, хімічної тощо. Конструкції таких змішувачів не завжди враховують фізико-механічні властивості сучасних кормових добавок, особливо при їхній малій частці у суміші. Це призводить до недостатньої однорідності комбікормів, появи зон локального перенасичення або дефіциту ключових компонентів, підвищення ризику метаболічних порушень у тварин і зниження ефективності використання дорогих добавок.

Крім того, значна частина серійного обладнання характеризується підвищеною питомою енергоємністю процесу змішування, наявністю застійних зон у змішувальній камері, недостатньо раціональною формою бункера та розташуванням робочих органів. За умов зростання вартості енергоносіїв, оплати праці та необхідності зниження собівартості продукції сільського господарства питання енергоощадності технологій кормоприготування набуває особливої актуальності.

Таким чином, існує суперечність між зростаючими вимогами до якості комбікормів для ВРХ, необхідністю точного дозування і рівномірного розподілу ключових компонентів у суміші, з одного боку, та недосконалістю наявних технічних засобів змішування – з іншого. Це обумовлює наукову й практичну

актуальність розроблення й дослідження змішувача комбікормів, конструктивно і режимно пристосованого до роботи з сипкими компонентами різних фізико-механічних властивостей за малої частки ключового компонента.

Об'єктом дослідження в даній дипломній роботі є процес приготування сипких комбікормових сумішей для великої рогатої худоби в умовах тваринницького підприємства.

Предметом дослідження є конструктивно-технологічні параметри та режими роботи лопатевого змішувача з конічною змішувальною камерою для попереднього змішування комбікормів з малою часткою ключового компонента.

Метою роботи є підвищення ефективності процесу приготування комбікормових сумішей для ВРХ шляхом обґрунтування параметрів і режимів роботи змішувача, які забезпечують високу однорідність суміші за мінімально можливою питомою енергоємністю.

У роботі використано методи аналізу та узагальнення науково-технічної інформації, теоретичного моделювання процесів руху сипких матеріалів у змішувачі, планування багатофакторного експерименту, математичної статистики та оптимізації, а також стандартні методики визначення фізико-механічних властивостей комбікормів і показників однорідності суміші.

1 Аналіз стану питання

1.1 Аналіз технічних засобів для змішування комбікормів

Усі комбікорми, що нині виробляються та застосовуються, мають вигляд сипких матеріалів – порошоків, дрібнодисперсних сумішей або гранул. Тому в господарствах, де передбачено приготування попередньої суміші комбікормів, для цієї мети використовують змішувачі порошкоподібних матеріалів різних модифікацій. У більшості випадків такі змішувачі запозичені з харчової, хімічної та інших галузей промисловості.

Як приклад, досить широко застосовують конусні вертикальні змішувачі серії СКВ та горизонтальні лопатеві змішувачі серії СВГ. Серед горизонтальних змішувачів також поширені машини з бункером у вигляді усіченого циліндра, які мають розвантажувальний отвір, вал з радіально встановленими стержнями, на яких закріплені лопатки та елементи стрічкової спіралі (рис. 1.1).

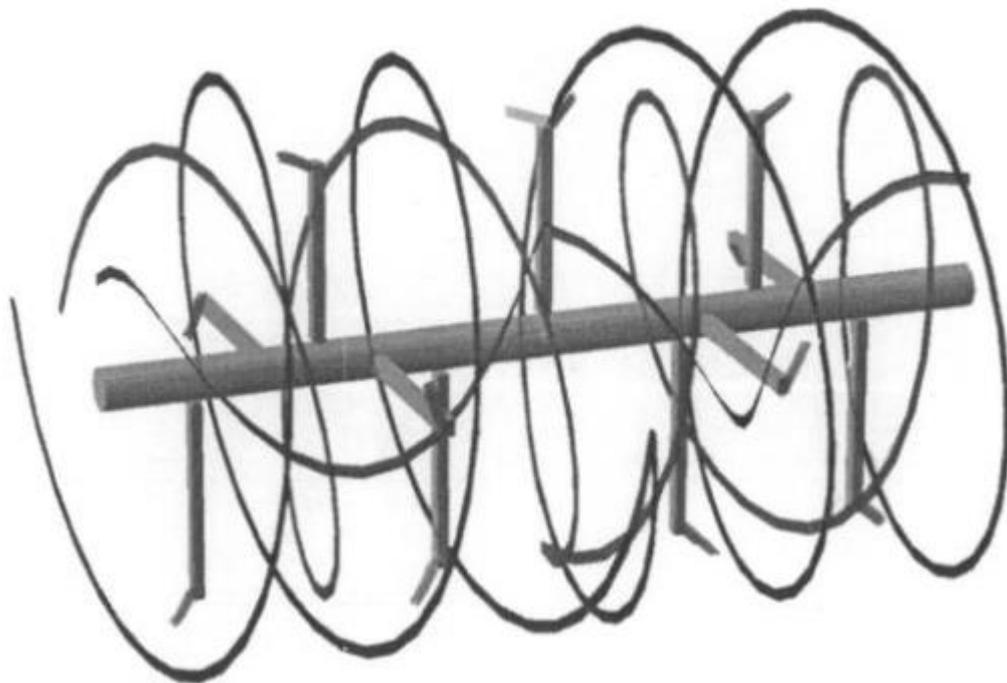


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд комбінованого шнека

Стрічкові спіралі, утворюючи шнеки, розміщують у два або три яруси радіально відносно приводного вала. Шнеки виконують із різним напрямком навивки. Їх поєднання в об'ємі змішувача організовано так, щоб забезпечити як осьовий, так і радіальний рух частинок змішуваного матеріалу. Така комбінація шнеків водночас забезпечує і транспортування готової суміші до розвантажувального отвору в днищі змішувача, обладнаного затвором. Конструктивна схема та загальний вигляд змішувача для приготування зернових сумішей, розробленого у ФАНЦ Північного Сходу, наведені на рисунку 1.2. Змішувач включає корпус 1, коритоподібну камеру змішування 2, стрічковий шнек 3, завантажувальний патрубок 4, розвантажувальний патрубок 5, електродвигун 6, редуктор 7, завантажувальний шнек 8 і шнек розвантаження 9.

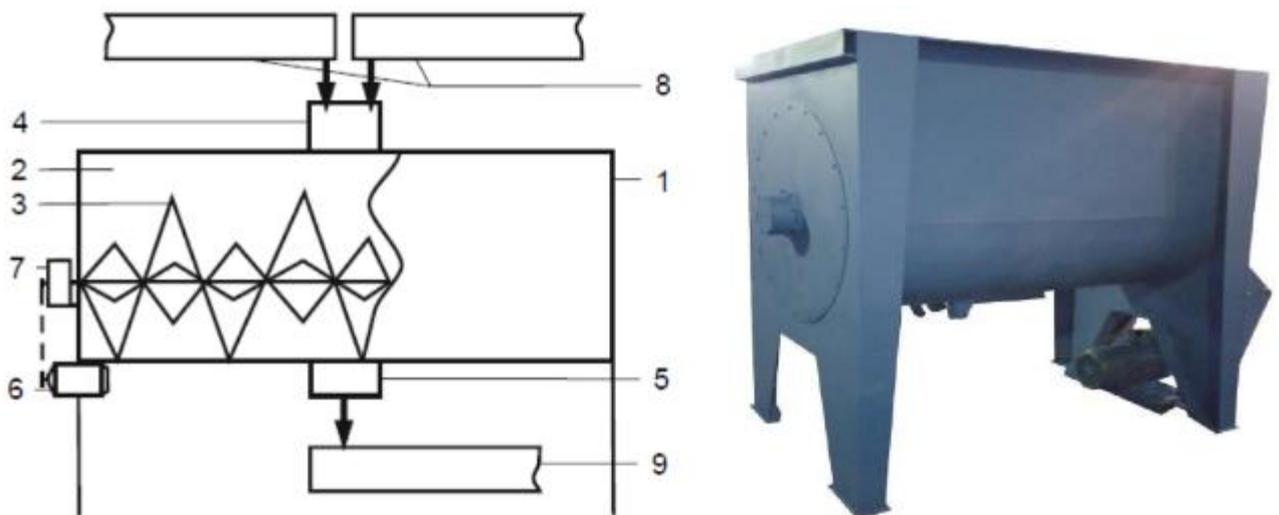


Рисунок 1.2 – Конструктивна схема та загальний вигляд змішувача

Змішувач цього типу добре зарекомендував себе при приготуванні зернових сумішей. Найкраща якість перемішування – 89,9 % однорідності – досягається за тривалості процесу близько 13 хвилин при питомій енергоємності 3,8 кВт·год/т. Водночас суттєвим недоліком є те, що за малої частки окремих компонентів суміші отримати якісний продукт практично неможливо.

На рисунку 1.3 показано двовальний горизонтальний шнеколопатевий змішувач періодичної дії. Змішувач складається з бункера 1, двох приводних

мотор-редукторів 2 та двох шнеколопатевих валів. Вали мають дві ділянки 3 і 4, що обертаються у протилежні боки. На першій частині вала розміщені шнекова навивка і лопатки 6, на другій – лопатки 7 і 8.

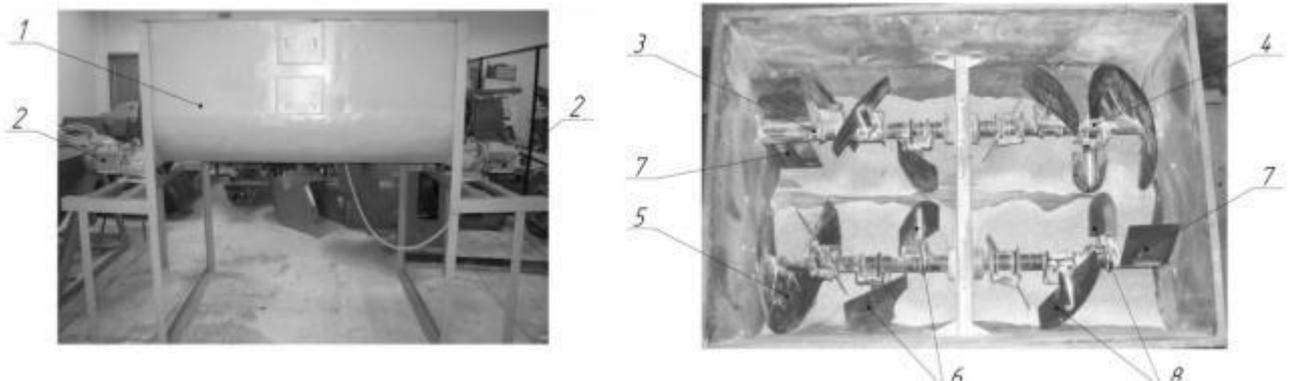
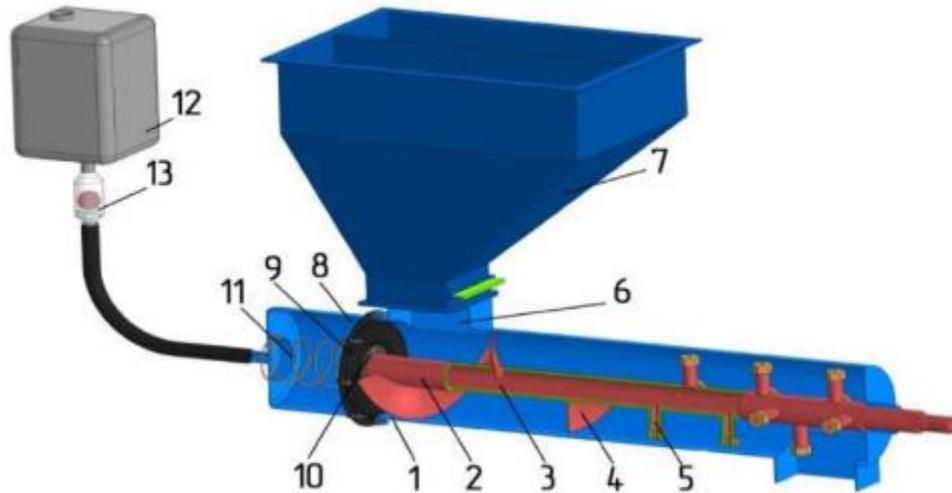


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд комбінованого шнека

Випробування горизонтального шнеколопатєвого змішувача показали високу ефективність його роботи. За частки ключового компонента 1 % найкраща якість змішування становила 93,6 % за тривалості процесу 360 с і коефіцієнті заповнення робочого об'єму 0,3. Змішувач призначений переважно для приготування вологих кормосумішей і працює у тихохідному режимі. Для порошкоподібних компонентів такий режим не забезпечує достатньо інтенсивної циркуляції суміші.

Відомий також шнеколопатєвий змішувач, конструкція якого дозволяє вводити рідкі компоненти безпосередньо в зоні змішування (рис. 1.4). Машина продемонструвала високу ефективність при приготуванні корму з побічних продуктів крохмального виробництва. Однорідність суміші при змішуванні віджатої кукурудзяної мезги зі згущеним екстрактом досягає 92–94 %, що забезпечується подачею екстракту саме в область інтенсивного перемішування.

На рисунку 1.5 наведено схему вертикального шнекового змішувача. Конструкція включає бункер 1, шнек 2, встановлений у корпусі 3. У нижній частині шнека змонтована лопатева мішалка 4, що обертається разом із ним. У верхній частині корпусу шнека 3 закріплений розсіювач 5.

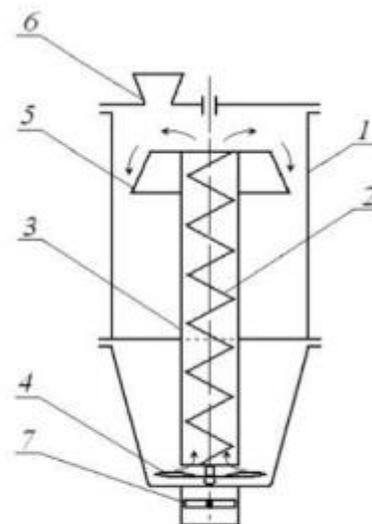


1 – корпус; 2 – робочий орган; 3 – порожнистий вал; 4 – шнековий конвеєр;
5 – порожниста лопать; 6 – вхідна горловина; 7 – бункер; 8 – камера екстракту.

Рисунок 1.4 – Схема шнеколопатевого змішувача



а)



б)

а) Загальний вигляд вертикального шнекового змішувача;

б) Схема вертикального шнекового змішувача.

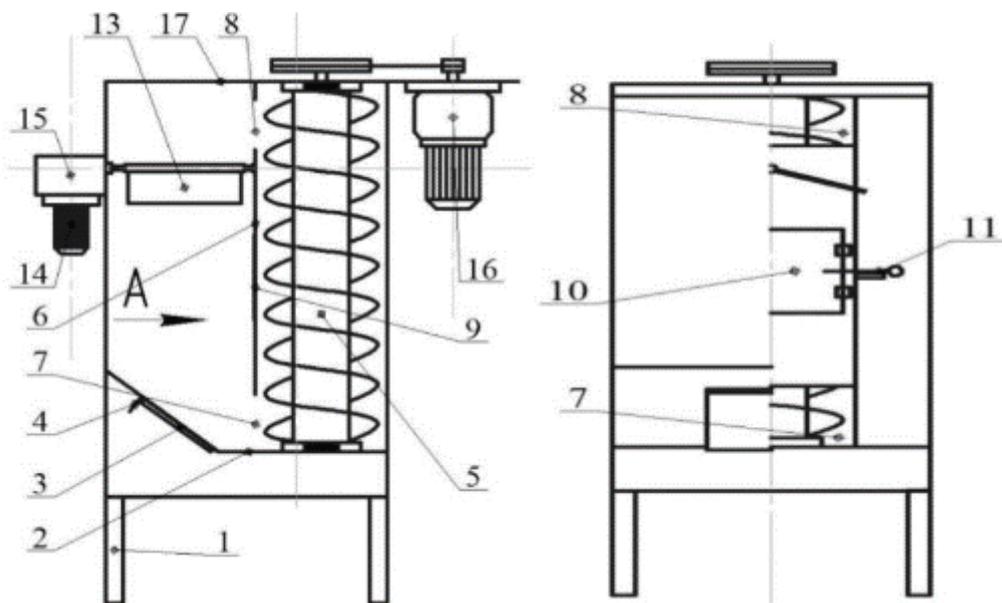
Рисунок 1.5 – Вертикальний шнековий змішувач

Перед початком роботи бункер заповнюють через приймальний патрубок 6, після чого вмикають привід і розпочинається процес змішування. Матеріал захоплюється шнеком з нижньої частини, підіймається вгору і розсіюється

розсіювачем. Після завершення змішування готову суміш вивантажують через розвантажувальне вікно 7. Однорідність у таких змішувачах досягається за кілька циклів, при цьому за один цикл приймають час, протягом якого весь об'єм суміші один раз проходить через шнек 2.

За використання вертикальних шнекових змішувачів із конусними розсіювачами однорідність суміші може досягати 94–96 % при тривалості змішування близько 350 с і концентрації ключового компонента на рівні 10 %. За меншої частки цього компонента досягти високої якості змішування в такому обладнанні вже неможливо.

На рисунку 1.6 показано змішувач-збагачувач концентрованих кормів. Процес змішування здійснюється завдяки сумісній роботі вертикального шнека та електромеханічного активатора. Активатор приводиться в дію електродвигуном з редуктором і кривошипно-шатунним механізмом, який надає йому коливальних рухів.



1 – рама; 2 – робоча камера; 3 – розвантажувальне вікно; 4 – шиберна заслінка; 5 – шнек; 6 – труба; 7 – завантажувальне вікно; 8 – вивантажувальне вікно; 9 – перепускне вікно; 10 – заслінка; 11 – рукоятка; 12 – фіксувальний пристрій; 13 – активатор; 14 – електродвигун; 15 – редуктор; 16 – мотор-редуктор; 17 – завантажувальна горловина.

Рисунок 1.6 – Схема вертикального шнекового змішувача

Сировина подається в робочу камеру 2 через горловину 17. Після заповнення камери вмикають шнек і починається змішування. Матеріал підіймається шнеком угору і надходить на лопаті активатора 13. Дія активатора руйнує суцільний потік матеріалу, формуючи інтенсивні турбулентні потоки, що підвищує ефективність змішування. Спільна робота шнека й активатора дозволяє за 4 хв підготувати порцію корма масою 50 кг з однорідністю понад 85 % за частки ключового компонента 15 %. До недоліків такого змішувача належать складність конструкції та обмежені можливості щодо якісного змішування при низькій концентрації окремих компонентів.

На рисунку 1.7 наведено конструктивну схему горизонтального змішувача кормів із робочим органом у вигляді гвинтової спіралі.

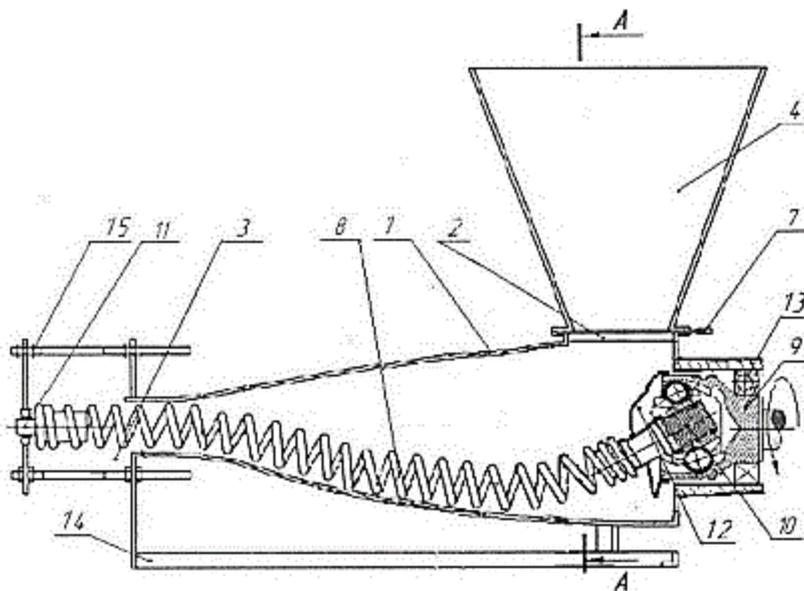


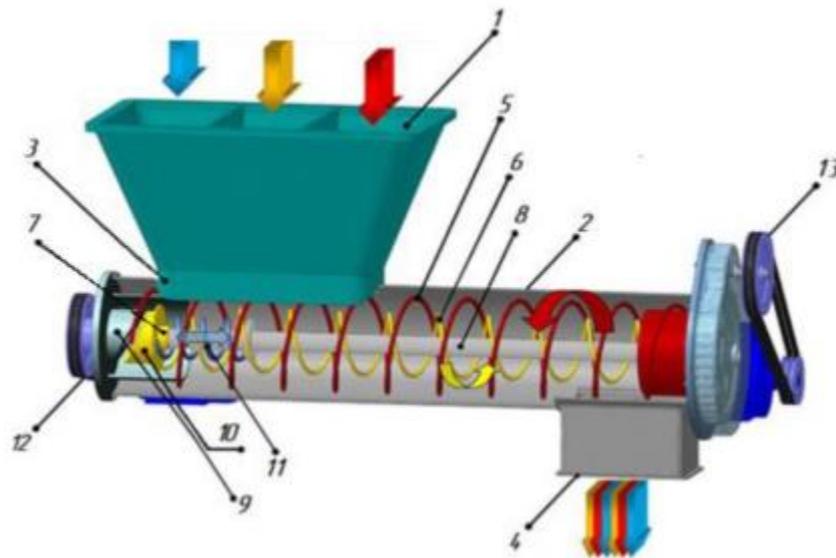
Рисунок 1.7 – Конструктивна схема змішувача кормів

Змішувач містить корпус 1, горловину 2, розвантажувальне вікно 3, бункер 4, утворений окремими секторами 5, розділеними перегородками 6. Під перегородками розташовані дозувальні заслінки 7. Усередині корпусу по всій його довжині розміщена гвинтова спіраль 8, один кінець якої через шарнір 10 з'єднаний із ведучою цапфою 9, а другий – закріплений на веденій цапфі 11. Корпус встановлено на рамі 14. За допомогою гвинтового механізму 15

здійснюють осьове переміщення веденої цапфи 11, змінюючи прогин спіралі і тим самим впливаючи на продуктивність змішувача.

Така конструкція дозволяє отримувати якісні суміші компонентів із різними фізико-механічними властивостями, зокрема при змішуванні побічних продуктів крохмального виробництва: кукурудзяної мезги з екстрактом, подрібненого кукурудзяного зерна та жмиху. Змішувач забезпечує однорідність кормової суміші на рівні 95–97 %.

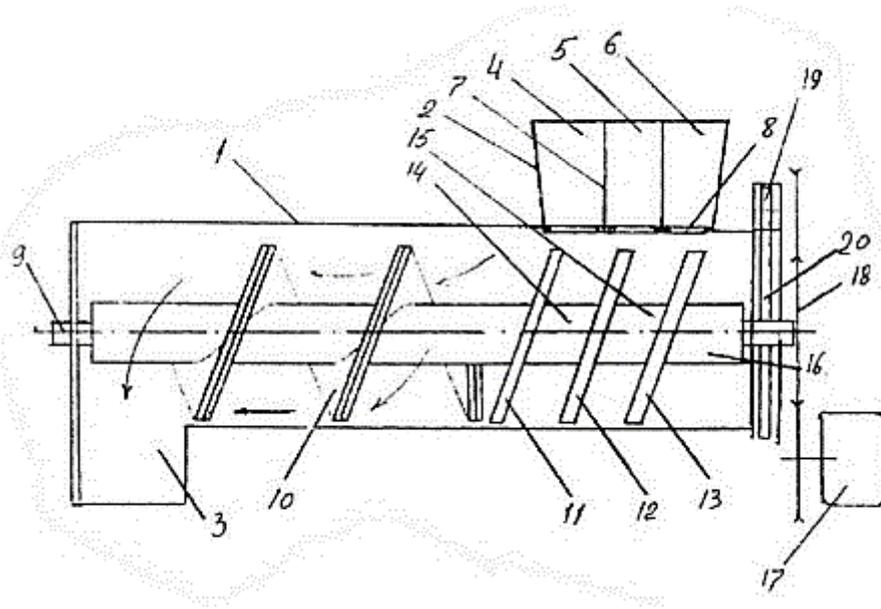
На рисунку 1.8 показано конструкцію двоспірального змішувача кормів. Це обладнання належить до змішувачів безперервної дії. Воно включає бункер 1, корпус 2, завантажувальне вікно 3 та розвантажувальне вікно 4. У середині бункера розміщені перегородки, що дають змогу змінювати розміри секцій залежно від кількості компонентів суміші. У циліндричному корпусі встановлено дві гвинтові спіралі 5 і 6, кожна з яких має власний привід. Особливістю змішувача є те, що внутрішня спіраль здійснює одночасно обертальний та зворотно-поступальний осьовий рух. Недоліком є ускладнена конструкція через наявність двох незалежних приводів, а також неможливість одержати якісні суміші за малої частки окремих компонентів.



1 – бункер; 2 – корпус; 3 – завантажувальне вікно; 4 – розвантажувальне вікно; 5, 6 – гвинтові спіралі; 7 – шліцьова втулка; 8 – вал; 9, 10 – порожнисті кулачки; 11 – пружина стиснення; 12, 13 – регульовані приводи.

Рисунок 1.8 – Двоспіральний змішувач кормів

На рисунку 1.9 наведено схему змішувача безперервної дії з робочим органом у вигляді комбінованого шнека.



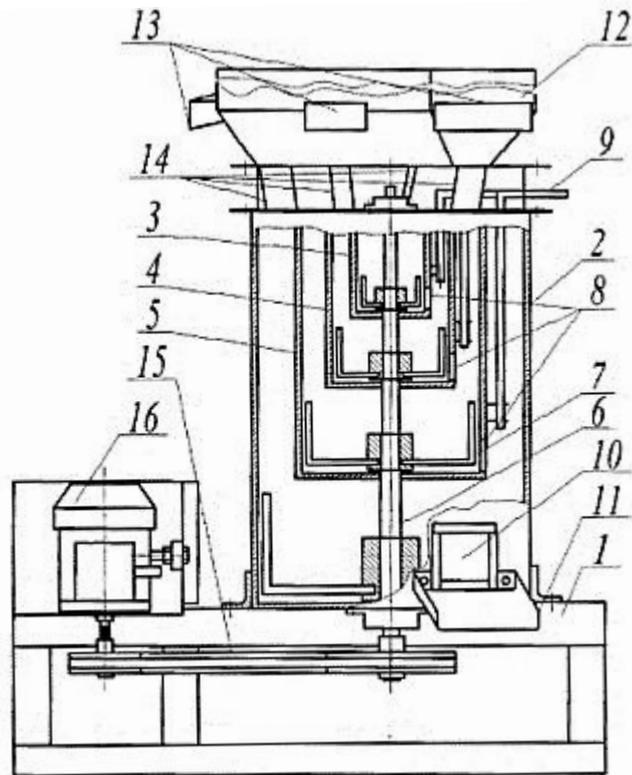
1 – кожух; 2 – бункер; 3 – розвантажувальне вікно; 4, 5, 6 – секції бункера;
7 – перегородка; 8 – заслінки; 9 – вал; 10 – шнек; 11, 12, 13 – нахилені
диски; 14, 15, 16 – розпірні втулки; 17 – електродвигун; 18 – клинопасова
передача; 19, 20 – шестерні.

Рисунок 1.9 – Схема змішувача з комбінованим шнеком

У процесі роботи компоненти надходять із секцій бункера в кожух, де під дією нахилених дисків та шнека, змішуючись, переміщуються до розвантажувального вікна 3. Подібну будову мають й інші змішувачі аналогічного призначення. Спільним недоліком таких конструкцій є неможливість отримати високоякісні суміші за малої частки окремих компонентів.

На рисунку 1.10 показано змішувач, особливістю якого є приготування кінцевої якісної суміші на основі попереднього змішування компонентів, що входять до складу у малих кількостях. Через центр корпусу змішувача та змішувальних ємностей проходить вал із закріпленими на ньому Г-подібними мішалками. Корпус змішувача та ємності обладнані розвантажувальними вікнами із заслінками. У верхній частині конструкції розташований бункер, поділений на чотири секції, об'єм яких пропорційний об'єму відповідних

змішувальних ємностей. Кожна секція бункера з'єднана зі своєю ємністю за допомогою гнучкого шланга.



1 – рама; 2 – корпус; 3, 4, 5 – циліндричні ємності; 6 – вал; 7 – лопаті; 8 – заслінки; 9 – рукоятка; 10 – заслінка; 11 – лоток; 12 – бункер; 13 – заслінки; 14 – шланги; 15 – пасова передача; 16 – електродвигун.

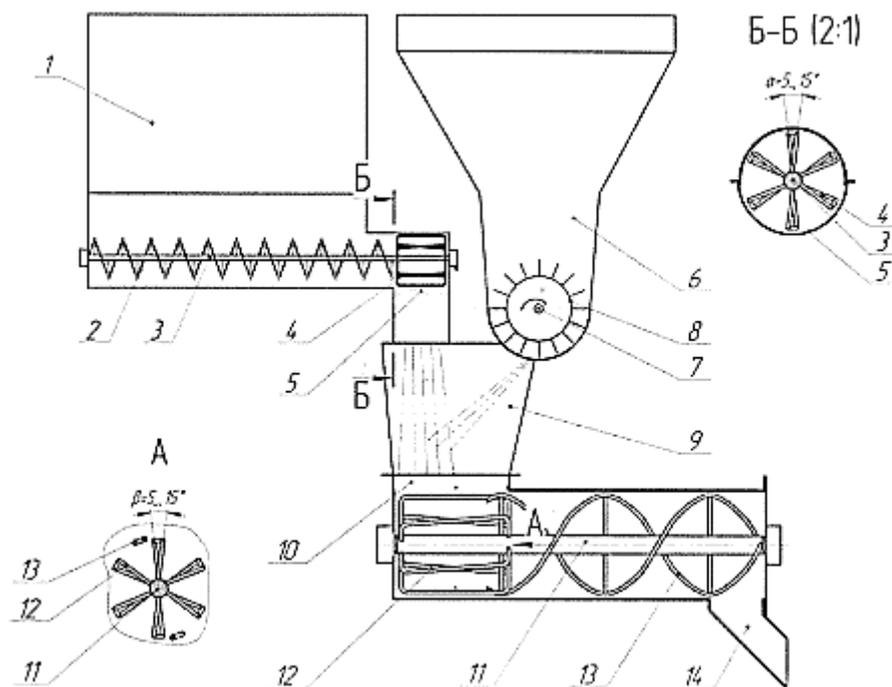
Рисунок 1.10 – Схема змішувача

Під час роботи змішувача суміш умовно розглядають як двокомпонентну: компонент із найменшою концентрацією та наповнювач. При завантаженні вихідних компонентів у бункер у найменшу секцію подають компонент з найнижчою часткою та частину наповнювача. Інші секції заповнюють аналогічно. На першому етапі матеріал із найменшої секції бункера надходить в ємність 3. Після завершення попереднього змішування отриману суміш вивантажують у більшу за об'ємом ємність 4, куди додатково подається наповнювач із відповідної секції бункера. Далі після змішування матеріал

аналогічно переходить у ємність 5 і в корпус 2, де відбувається кінцеве змішування компонентів.

Застосування попереднього змішування дозволяє скоротити загальну тривалість процесу у 2–3 рази. Конструкція забезпечує однорідність суміші на рівні близько 95 % за частки ключового компонента 1 %, що є дуже високим показником і досягається завдяки поетапному змішуванню та формуванню турбулентних потоків матеріалу. Питома енергоємність процесу при цьому становить 14,3 кВт·год/т. Основними недоліками є конструктивна складність і значна енергоємність змішування.

Також відоме комбіноване обладнання безперервної дії для змішування сухих кормів і добавок, яке містить камеру попереднього змішування та камеру основного змішування (рис. 1.11).

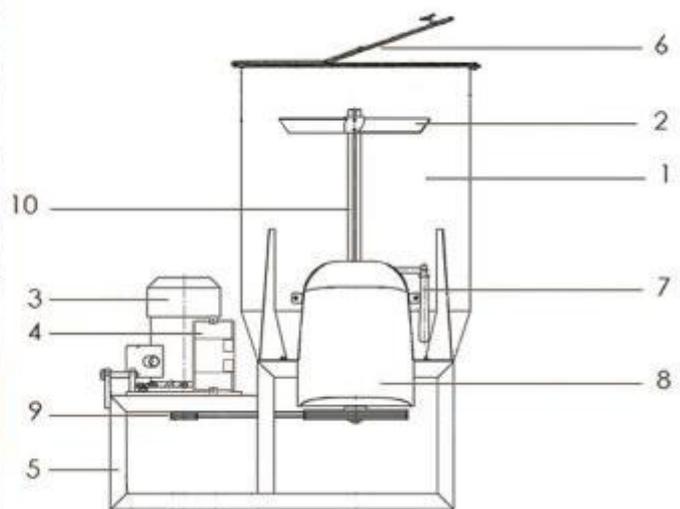


1 – бункер-живильник основного компонента; 2 – розвантажувальний спіраль-гвинтовий шнек; 3 – вал; 4 – ворошитель; 5 – сітка; 6 – бункер-дозатор добавок; 7 – вал; 8 – лопатеві барабани; 9 – камера попереднього змішування; 10 – камера основного змішування; 11 – приводний вал; 12 – мішалка; 13 – спіраль-гвинтовий конвеєр; 14 – лоток розвантаження.

Рисунок 1.20 – Комбінований пристрій безперервної дії для змішування сухих кормів і добавок

Корм із бункера 1 через шнек і ворошитель подається в камеру попереднього змішування. Одночасно з бункера-дозатора 6 у цю ж камеру надходять добавки, потік яких «бомбардує» основний потік корма з бункера 1, забезпечуючи інтенсивне попереднє перемішування. Отримана таким чином суміш надходить у камеру основного змішування 10, де формується кінцевий продукт. Такий підхід дозволяє одержати суміш з однорідністю близько 90 % за частки ключового компонента понад 10 %. При меншій частці ключового компонента досягти високої якості змішування практично неможливо, що, поряд із конструктивною складністю, є основним недоліком цього пристрою.

На рисунку 1.11 наведено загальний вигляд та схему центробіжного лопатевого змішувача ВЛС із вертикально розташованим валом і радіальними лопатевими мішалками.



1 – бункер; 2 – лопатева мішалка; 3 – електродвигун; 4 – пускач; 5 – опорна рама; 6 – кришка; 7 – важіль заслінки; 8 – лоток розвантаження; 9 – пасова передача; 10 – вал.

Рисунок 1.11 – Відцентровий лопатевий змішувач ВЛС

Змішувач призначений для роботи з сухими сипкими матеріалами. На валу розташовані дві лопатеві мішалки: одна змонтована в нижній частині, біля дна змішувача, інша – у верхній зоні робочої камери. Таке компонування забезпечує інтенсивне перемішування матеріалу по всьому об'єму.

Схоже конструктивне виконання має відцентровий змішувач СЛ (рис. 1.12). На відміну від змішувача ВЛС, змішувач СЛ оснащений комбінованим шнеколопатевим робочим органом. Лопатеві мішалки закріплені на валу в три яруси, причому лопаті встановлені під кутом, що забезпечує переміщення суміші вгору. Одночасно діяння шнека формує зворотний потік матеріалу донизу, що значно інтенсифікує процес змішування.

Привід змішувача СЛ реалізовано безпосередньо від черв'ячного мотор-редуктора, що свідчить про відносно невисоку частоту обертання мішалки. За даними виробників, однорідність сумішей, отримуваних у змішувачах типу ВЛС і СЛ, може досягати близько 95 %.



Рисунок 1.22 – Змішувач СЛ

Для змішування сипких порошкоподібних матеріалів також застосовують гравітаційні змішувачі типу «п'яна бочка». На рисунку 1.13 показано загальний вигляд такого гравітаційного змішувача. Циліндричний бункер, що утворює камеру змішування, має корисний об'єм 33 л. Бункер встановлюється під кутом у обертовій рамці, при цьому передбачена можливість регулювання кута нахилу

в діапазоні 15–60° з кроком 15°, а також вертикальне положення для завантаження та розвантаження матеріалу.

Установка обладнана мотор-редуктором і панеллю керування. Змішування відбувається за рахунок обертання циліндричного бункера, встановленого під кутом до горизонталі. Відсутність будь-яких мішалок усередині бункера та невисока швидкість його обертання запобігають надмірному тертю та подрібненню частинок під час процесу. Конструкції такого типу дають змогу отримувати суміші з однорідністю понад 90 % при коефіцієнті заповнення бункера, що дорівнює 0,5. Водночас недоліками цих змішувачів є невисока продуктивність та неможливість забезпечити високу якість змішування при малих концентраціях окремих компонентів у суміші.



Рисунок 1.23 – Загальний вигляд гравітаційного змішувача

Наявні на ринку змішувачі не повною мірою відповідають вимогам, що висуваються до обладнання для технологічних ліній приготування комбікормів. Це зумовлено, зокрема, необґрунтованістю їх конструктивних параметрів і режимів роботи з урахуванням фізико-механічних властивостей сучасних кормових добавок. До суттєвих недоліків також належить неможливість отримання високоякісних сумішей із малою часткою ключового компонента за умови збереження низької питомої енергоємності процесу змішування.

1.2 Методи відбору проб для оцінки якості змішування

У процесі змішування відбувається переміщення частинок окремих компонентів відносно одна одної з метою досягнення такого стану, за якого в кожному мінімальному об'ємі відібраної для аналізу проби концентрація окремих компонентів відповідає їхнім часткам, закладеним у змішувач. Насправді досягти ідеального змішування неможливо, оскільки на формування якісної суміші впливає велика кількість чинників. Вони пов'язані з конструктивними параметрами змішувача, фізико-механічними властивостями змішуваних матеріалів і застосованими методами змішування. При цьому рівномірність розподілу компонентів у суміші розглядають як випадкову величину.

Для відбору проб сумішей сипких матеріалів застосовують метод квартування та метод точкового відбору проб.

Метод квартування найчастіше використовують під час аналізу роботи змішувачів періодичної дії. Увесь об'єм суміші або його частину висипають на плоский піддон і рівномірно розподіляють тонким шаром. Потім площу шару умовно ділять на 20–40 рівних квадратів, з кожного з яких відбирають проби приблизно однакової маси.

Недоліком цього методу є необхідність повного вивантаження суміші для подальшого аналізу. Під час розвантаження руйнується структура, що сформувалася у процесі змішування, тому виявити можливі мертві зони в робочому об'ємі змішувача практично неможливо.

Метод точкового відбору проб набув широкого поширення. Для цього застосовують циліндричний пробовідбірник, що складається з порожнистого циліндричного корпусу 1 із конічним наконечником, у якому виконані вікна 2 (рис. 1.14). Усередину корпусу 1 вставляють трубку 3 з вікнами 4, кожне з яких сполучене з окремою ізольованою камерою для відбору проб. Ричаг 5 забезпечує перекриття вікон пробовідбірника шляхом повороту трубки 3 у корпусі 1.

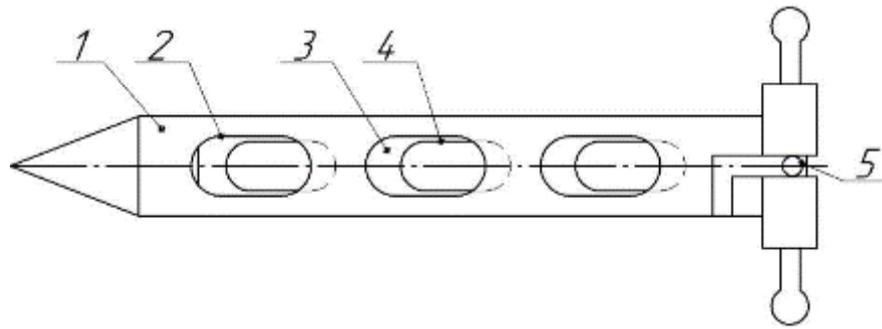


Рисунок 1.14 – Пробовідбірник

Під час введення пробовідбірника в суміш вікна 4 закриті. Після занурення на потрібну глибину вікна 4 відкривають, суміщаючи їх з вікнами 2 за допомогою важеля 5. У результаті ізольовані камери трубки 3 заповнюються сумішшю. Після цього вікна знову закривають, а пробовідбірник виймають із суміші. Перевагою цього методу є те, що проби відбираються безпосередньо з робочого об'єму змішувача, що дає можливість оцінити фактичний розподіл компонентів та виявити наявність мертвих зон.

1.3 Методи оцінки якості змішування

Оцінювання якості змішування здійснюють шляхом аналізу відібраних проб суміші та полягає у встановленні рівномірності розподілу компонентів після змішування. Зазвичай достатньо визначити розподіл одного компонента, який має найменшу частку в суміші і називається ключовим. Ключовий компонент може входити до основного складу суміші або спеціально вводиться до неї, залежно від умов експерименту.

Одним із найпоширеніших методів оцінки якості змішування є ваговий аналіз. У межах цього підходу пробу суміші поділяють на основний і ключовий компоненти. Розділення здійснюють вручну, на ситах або із застосуванням повітряних сепараторів. Після цього окремі компоненти зважують і визначають їхній відсотковий вміст у пробі. Перевагами методу є відносна простота, низька вартість виконання та достатньо висока точність результатів.

Застосовується також метод аналізу проб багатокomпонентних сумішей, заснований на ефекті фотолюмінесценції. У цьому випадку компонент, обраний як ключовий, перед завантаженням у змішувач покривають фотолюмінесцентним розчином, здатним випромінювати світло після опромінення ультрафіолетом. Частка такого компонента, наприклад, може становити близько 10 %. Після завершення змішування відбирають проби суміші й розміщують їх у герметичних камерах, де опромінюють ультрафіолетовим випромінюванням, що викликає флуоресценцію ключового компонента. Далі проби фотографують, а отримані зображення обробляють у спеціалізованому програмному забезпеченні. Дослідження показали, що цей метод є ефективним для визначення вмісту ключового компонента у багатокomпонентних гранульованих сумішах.

Відомий також підхід до оцінки якості багатокomпонентної суміші, що ґрунтується на аналізі фотоізоображень із використанням методу кластеризації К-середніх. Під кластеризацією розуміють виявлення на двовимірному зображенні груп точок (кластерів), що відповідають окремим компонентам. Зображення розбивають на К кластерів, де К дорівнює кількості компонентів суміші. На початку задають випадкові початкові координати центрів кластерів. Після першого розподілу точок зображення за кластерами положення центрів мас коригують, і розрахунок повторюють. Процес триває доти, доки координати нових центрів не перестають змінюватися. У підсумку отримують сегментоване зображення, на основі якого визначають коефіцієнт однорідності змішування (рис. 1.15).

Метод кластеризації К-середніх є чутливим до цифрового шуму зображень, тому перед обробкою необхідне попереднє фільтрування та поліпшення якості знімків.

Широкого застосування набув метод аналізу проб із використанням мікротрейсерів. Мікротрейсери – це феромагнітні частинки заліза або нержавіючої сталі, покриті шаром харчового барвника, з розмірами приблизно 150–350 мкм і гарантованою кількістю частинок у грамі (як правило, від десятків до сотень тисяч). Дозування мікротрейсерів зазвичай не перевищує кількох

десятків грамів на тонну кормосуміші. Аналіз здійснюють у банці Мейсона або за допомогою спеціального пристрою у вигляді циліндричної ємності, на одному з торців якої встановлено магніт з накладкою з фільтрувального паперу. Пробу завантажують у ємність і інтенсивно струшують; мікротрейсери, що містяться в пробі, під дією магніту збираються на паперовій накладці. Потім на папір наносять рідину, у якій розчиняється барвник, утворюючи кольорові плями. Після висушування паперу плями підраховують.

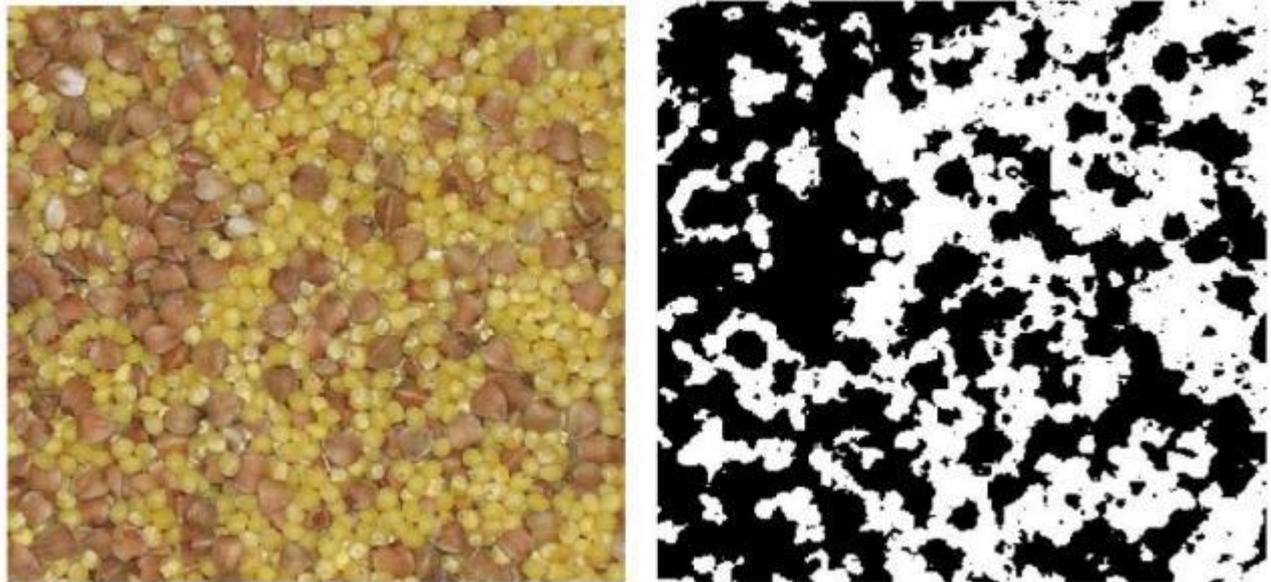


Рисунок 1.15 – Сегментоване зображення для оцінювання якості багатокомпонентної суміші

Застосування мікротрейсерів вимагає дуже точної подачі й виділення частинок, а також ретельних подальших обчислень, що пов'язано з малими розмірами та масою цих маркерів. Тому практична реалізація методу без спеціально обладнаної лабораторії є утрудненою.

Для визначення однорідності суміші використовують також хімічні методи. Найбільш поширеним є титриметричний аналіз, заснований на вибірковій реакції реагента (титранта) з ключовим компонентом суміші. У цьому випадку проби, відібрані з суміші, розчиняють в окремих колбах, після чого проводять титрування – по краплях додають титрант доти, доки співвідношення між кількістю ключового компонента та введеним титрантом не зумовить помітну зміну властивостей розчину (зміну кольору, випадання осаду тощо).

Вміст ключового компонента в пробі розраховують за об'ємом витраченого титранта.

Одним із методів аналітичної хімії, який застосовують для оцінювання якості кормів, є атомно-абсорбційна спектроскопія. Цей метод дозволяє визначати якість кормосумішей, що містять наночастинки металів, і вирізняється дуже високою точністю – частка ключового компонента може становити тисячні частки відсотка.

Кондуктометричний метод аналізу проб ґрунтується на вимірюванні електропровідності розчину залежно від концентрації в ньому ключового компонента. Як ключовий компонент часто використовують кухонну сіль. Метод дає змогу з високою точністю визначати вміст хлориду натрію у досить широкому діапазоні концентрацій.

Різноманіття застосовуваних методів оцінки якості змішування зумовлене відмінностями у фізико-хімічних та фізико-механічних властивостях компонентів, а також вимогами до точності результатів. Під час вибору конкретного методу аналізу проб беруть до уваги не лише точність та чутливість, а й вартість його реалізації та доступність необхідного обладнання.

1.4 Висновки

Існуючі конструкції змішувачів не повною мірою відповідають вимогам щодо отримання високоякісної суміші з малою часткою ключового компонента за умови низької питомої енергоємності змішування для використання в технологічних лініях приготування кормів. Це пов'язано з тим, що їхні параметри та режими роботи недостатньо обґрунтовані з урахуванням фізико-механічних властивостей сучасних кормових добавок.

За результатами аналізу методів контролю якості змішування найбільш доцільним є використання методу точкового відбору проб, який дає змогу оцінити взаємне розташування компонентів суміші, що сформувалося в процесі змішування, і виявити мертві зони в об'ємі змішувача. Ваговий аналіз проб є найпростішим і найбільш доступним способом визначення концентрації

ключового компонента в пробі, забезпечуючи при цьому достатньо високу точність результатів.

Виходячи з проведеного аналізу, сформульовано мету роботи – підвищення ефективності приготування комбікормів шляхом обґрунтування параметрів і режимів роботи змішувача.

Відповідно до поставленої мети визначено такі завдання дослідження:

- провести аналіз технічних засобів для змішування сипких матеріалів;
- розробити теоретичні залежності енергетичних і потужнісних показників процесу змішування з урахуванням фізико-механічних властивостей комбікормів;
- виконати експериментальні дослідження змішувача в лабораторних умовах і встановити вплив його конструктивних параметрів та режимів роботи на якість суміші й питому енергоємність процесу змішування;
- визначити економічну ефективність запропонованого технічного рішення.

2 Теоретичне обґрунтування параметрів змішувача

2.1 Передумови до розроблення змішувача комбікормів

Комбікорми, які готують для великої рогатої худоби, зазвичай є дрібнодисперсними сипкими матеріалами (порошки, гранули, дрібні крихти). Для їх змішування широко застосовують центробіжні змішувачі з вертикальним валом і лопатевими робочими органами. У таких машинах властивості сформованого псевдозрідженого шару, а також енергоємність процесу значною мірою залежать від геометрії лопаті та режимів її обертання.

Для оцінки впливу геометрії робочого органа на процес змішування вводять коефіцієнт довжини лопаті:

$$K_L = \frac{L}{R_{cm}} \quad (2.1)$$

де K_L – коефіцієнт довжини лопаті;

L – довжина лопаті мішалки, мм;

R_{cm} – радіус ємності змішувача, мм.

Експериментально встановлено, що при частоті обертання лопатей до 1000 об/хв ступінь неоднорідності суміші практично не змінюється незалежно від довжини лопатей. За подальшого підвищення частоти обертання збільшення довжини лопаті за рахунок наближення її кінця до стінки бункера погіршує інтенсивність циркуляції частинок: вони раніше втрачають швидкість, більше ударяються об стінки, частіше руйнуються, посилюється утворення пилу й нагрівання шару.

Для інтенсифікації процесу змішування в таких апаратах доцільно формувати псевдозріджений шар матеріалу. Зі збільшенням швидкості обертання лопатей послідовно спостерігаються такі стадії (рис. 2.1):

- при малих швидкостях на поверхні шару виникають незначні хвилеподібні коливання;

- зі зростанням швидкості амплітуда хвиль збільшується, на поверхні з'являються валики матеріалу;
- далі частинки починають активно переміщуватися по всьому об'єму, шар розрихлюється, висота шару збільшується на 10–15 %, матеріал переходить у псевдозріджений стан.

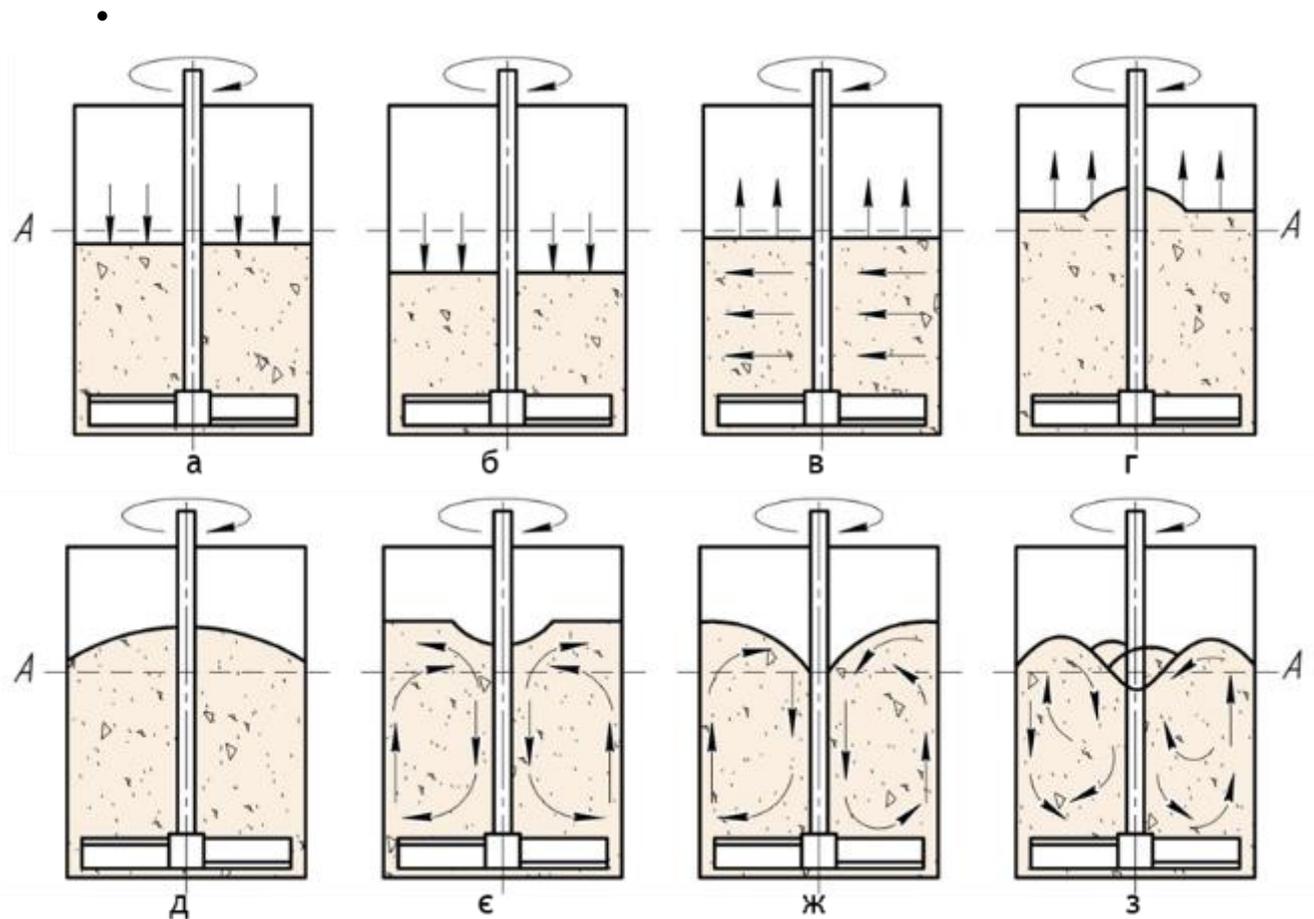


Рисунок 2.1 – Етапи формування псевдозрідженого стану сипкого матеріалу залежно від швидкості обертання лопатевої мішалки

Для опису умов псевдозрідження використовують безрозмірний параметр висоти шару:

$$H_b = \frac{H}{b} = 6 \dots 10 \quad (2.2)$$

де H – висота шару матеріалу над лопаттю,

b – висота (ширина по радіусу) лопаті.

Менші значення H_b відповідають легким і середнім матеріалам, більші – важким. Більшість комбікормових компонентів має насипну густина орієнтовно 500–800 кг/м³, що відповідає легким і середнім матеріалам, а густина комбікормової суміші за типовими раціонами становить ≈ 900 кг/м³. При менших значеннях H_b потрібна менша окружна швидкість на краю лопаті для досягнення псевдозрідження.

$$H_b = \frac{H}{b} = 6 \dots 10 \quad (2.2)$$

b – висота (ширина по радіусу) лопаті, м.

Потужність, що витрачається на ущільнення шару матеріалу лопатевою мішалкою, можна оцінити залежністю:

$$N_y = c_1 \cdot \rho_n \cdot \omega^{1.2} \cdot L \cdot (b \cdot \sin \beta)^{0.32} \cdot H^{1.04} \cdot \tau_y \quad (2.3)$$

c_1 – коефіцієнт опору в режимі ущільнення;

ρ_n – насипна густина матеріалу, кг/м³;

ω – кутова швидкість обертання вала, с⁻¹;

L – довжина лопаті, м;

b – ширина лопаті, м;

β – кут атаки лопаті, градус або рад;

H – висота шару матеріалу над лопаттю, м;

τ_y – коефіцієнт, що характеризує ступінь усадки матеріалу.

За результатами досліджень відомо, що з ростом окружної швидкості на краю лопаті питома енергоємність спочатку зменшується, досягає мінімуму в зоні швидкостей, що відповідають початку псевдозрідження, а потім знову зростає. На рис. 2.2 наведено характерні залежності питомих витрат енергії від окружної швидкості при різних значеннях відношення H/b .

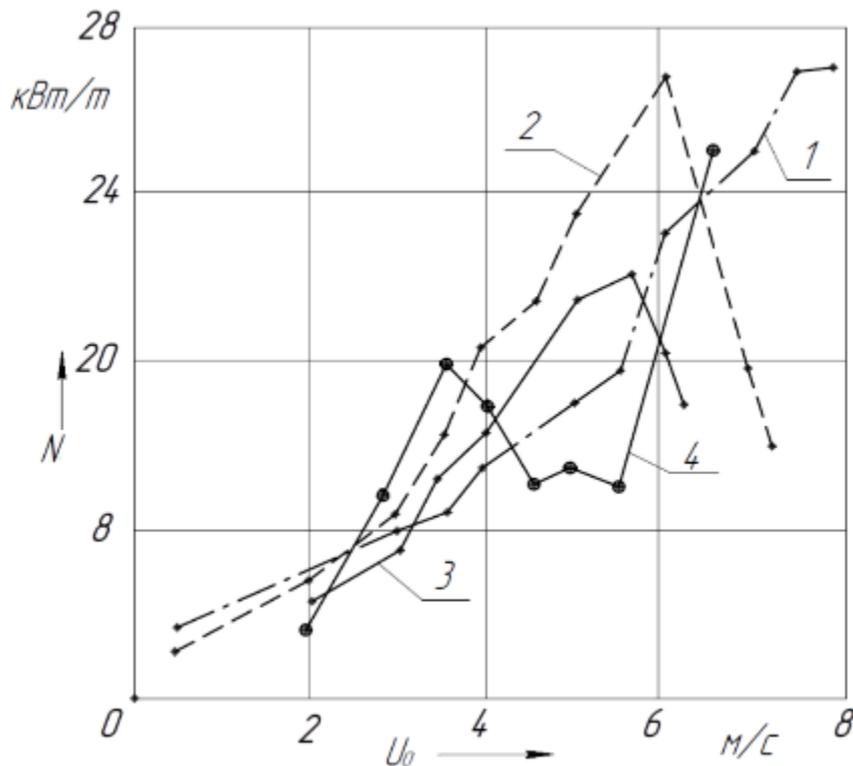


Рисунок 2.2 – Залежність питомих витрат енергії від окружної швидкості на краю лопаті за різних значень відношення N/b

Отже, для забезпечення енергоощадного режиму необхідно вибрати таку комбінацію висоти шару та швидкості обертання, за якої матеріал переходить у псевдозріджений стан при мінімальних витратах енергії. Відомі конструкції змішувачів комбікормів не повною мірою враховують ці умови, що й зумовлює потребу в їх подальшому вдосконаленні.

2.2 Визначення параметрів змішувача комбікормів

У переважній більшості відомих конструкцій корпус змішувача виконаний у вигляді циліндричного бункера з плоским днищем. Під час змішування частинки матеріалу у нижній частині бункера захоплюються лопатями й вдаряються об стінки. Частина наданої їм енергії витрачається на деформацію та нагрів матеріалу, а також на прилипання до поверхні, що приводить до зменшення швидкості частинок і до непродуктивних енергетичних втрат.

Ефект зіткнення частинок зі стінкою характеризують коефіцієнтом відновлення швидкості:

$$k = v_k / v_n \quad (2.4)$$

де v_n – модуль швидкості частинки до удару об стінку, м/с;

v_k – модуль швидкості частинки після удару, м/с.

Чим менше значення k , тим більша втрата швидкості й енергії під час удару, а отже, тим гірші умови циркуляції в шарі.

Швидкість переміщення частинок у шарі є одним із ключових факторів формування псевдозрідженого стану. Щоб знизити енергоємність процесу, конструкція змішувача має забезпечувати такі умови, за яких частинки матеріалу ударяються об стінки бункера під певним кутом, а не перпендикулярно до них.

У випадку циліндричного корпусу реалізуються умови прямого удару, коли вектор швидкості частинки в момент зіткнення спрямований по нормалі до поверхні (рисунок 2.3). Оскільки ударні сили дуже великі й за надзвичайно малий проміжок часу зростають від нуля до значного значення і знову спадають до нуля, у теорії удару для оцінки взаємодії тіл використовують не самі сили, а їхні ударні імпульси \bar{S} , які є кінцевими величинами. Дія інших, «неударних» сил (наприклад, сили тяжіння) при цьому, як правило, не враховується.

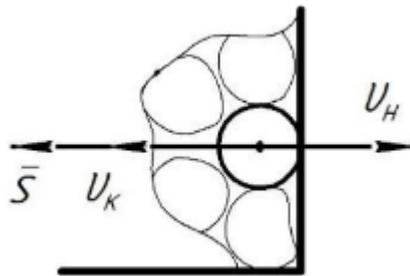


Рисунок 2.3 – Умови прямого удару

Після прямого удару вектор швидкості частинки в кінці зіткнення спрямований по нормалі до стінки корпусу і протилежно напрямку основного потоку, який створюється мішалкою. Унаслідок цього можливе ущільнення суміші, інтенсивне стирання й нагрівання частинок, що приводить до зростання енергоємності процесу. Тому доцільно обґрунтувати такий кут нахилу робочих

поверхонь бункера, за якого потік частинок взаємодіє з ними під деяким кутом, а не перпендикулярно.

За таких умов реалізується косий удар (рисунок 2.4), коли вектор швидкості частинки нахилений під кутом до площини зіткнення.

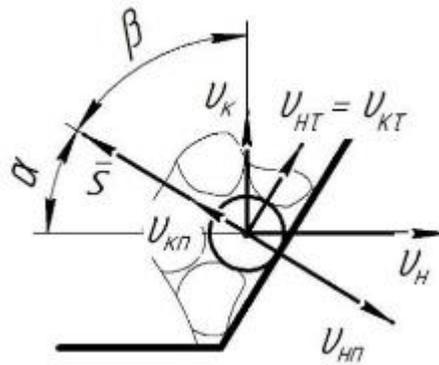


Рисунок 2.4 – Умови косоного удару

Якщо знехтувати впливом сил тертя, можна вважати, що дотична складова швидкості частинки v_t при ударі не змінюється. За інших однакових умов кінцева швидкість частинки після удару визначається лише кутом α між вектором швидкості та нормаллю до площини зіткнення.

На рисунку 2.5 наведено розрахункову схему змішувача. Для формування висхідного потоку матеріалу та зменшення втрат швидкості днище бункера виконано у вигляді усіченого конуса. Щоб уникнути утворення застійних зон, кут при основі конуса приймають рівним подвоєному значенню кута природного укосу комбікормових сумішей.

Щоб зменшити втрати енергії та поліпшити формування висхідних потоків матеріалу, в даній роботі пропонується виконати дно бункера у вигляді усіченого конуса (рис. 2.5). Кут при основі конуса приймається рівним подвоєному куту природного укосу суміші комбікормів, що дає змогу мінімізувати застійні зони.

Технологічно необхідний об'єм змішувача визначають з урахуванням розміру технологічної групи тварин, добової норми та кількості годувань. Для змішувача комбікормів він може бути розрахований за формулою:

$$V_3 = \frac{n_i \cdot m_{\text{гол}}}{\rho_n \cdot k_i} \quad (2.5)$$

де V_3 – технологічно необхідний об'єм змішувача, м³;

n_i – кількість корів у технологічній групі, гол.;

$m_{\text{гол}}$ – добова маса комбікорму на одну голову, кг/гол.;

ρ_n – насипна густина комбікорму, кг/м³;

k_i – кратність згодовування протягом доби.

Конструктивний об'єм змішувача V_k пов'язують з технологічним через коефіцієнт заповнення φ :

$$V_3 = V_k \cdot \varphi \quad (2.6)$$

де V_k – конструктивний (геометричний) об'єм змішувача, м³;

φ – коефіцієнт заповнення робочого об'єму змішувача матеріалом.

Для відцентрових змішувачів φ зазвичай знаходиться в межах 0,5–0,7. Для подальших розрахунків приймаємо $\varphi \approx 0,6$.

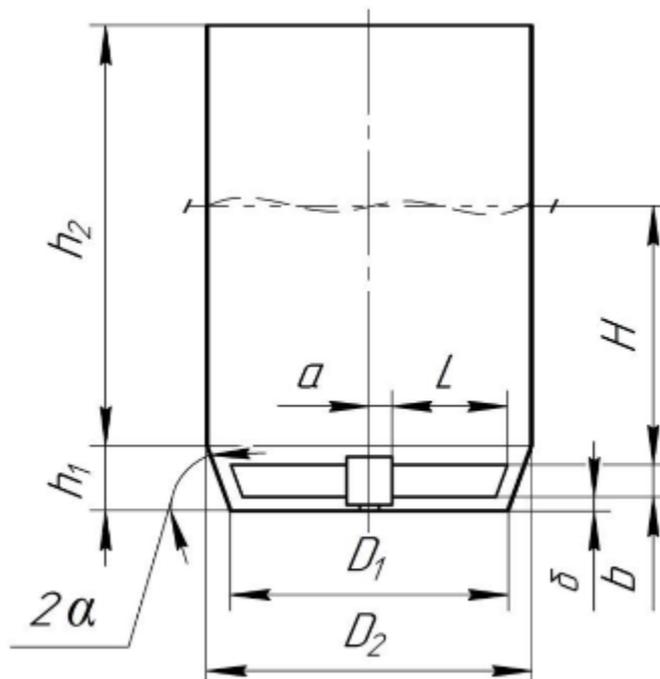


Рисунок 2.5 – Розрахункова схема змішувача

Корпус змішувача складається з нижньої конічної частини висотою h_1 та верхньої циліндричної частини висотою h_2 . У конічній зоні радіус біля вершини дорівнює R_1 , на стику з циліндричною частиною – R_2 . Над лопаттю формується шар матеріалу висотою H , а зазор між краєм лопаті й корпусом позначимо δ (рис. 2.5).

Згідно зі схемою (рис. 2.5), ширина лопаті за висотою шару над нею визначається як:

$$b = h_1 - 2\delta \quad (2.7)$$

b – висота (ширина по радіусу) лопаті, м;

h_1 – висота конічної частини бункера, м;

δ – радіальний зазор між краєм лопаті та стінкою бункера, м.

Радіус меншого кола усіченого конуса:

$$R_1 = R_2 - h_1 \cdot \text{ctg}(2\alpha) \quad (2.8)$$

де R_1 – радіус меншої основи усіченого конуса, м;

R_2 – радіус більшої основи усіченого конуса, м;

h_1 – висота конічної частини бункера, м;

α – кут природного укосу комбікорму, град.

Коефіцієнт заповнення, з урахуванням співвідношення технологічного й конструктивного об'ємів, можна записати як:

$$\varphi = \frac{V_3}{V_k} \quad (2.9)$$

Об'єм вільного простору (не зайнятого сумішшю) у бункері:

$$V_\emptyset = V_k - V_3 = \pi R_2^2 (h_2 + \delta - H) \quad (2.10)$$

З іншого боку, вільний об'єм виражається через коефіцієнт заповнення:

$$V_{\text{в}} = V_{\text{к}}(1 - \varphi) \quad (2.11)$$

Прирівнюючи (2.10) та (2.11) и підставляючи геометричний вираз для $V_{\text{к}}$ (сума об'ємів усіченого конуса та циліндра), отримують рівняння:

$$\frac{\frac{1}{3} \pi h_1 (R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2) + \pi R_2^2 h_2}{\pi R_2^2 (h_2 + \delta - H)} = \frac{1}{1 - \varphi} \quad (2.12)$$

Після скорочення на πR_2^2 :

$$\frac{1}{3} h_1 \left(\frac{R_1^2}{R_2^2} + 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) + h_2 = \frac{h_2 + \delta - H}{1 - \varphi} \quad (2.13)$$

Звідси висоту циліндричної частини бункера h_2 можна подати у вигляді:

$$h_2 = \frac{1}{\varphi} \left[\frac{1}{3} h_1 \left(\frac{R_1^2}{R_2^2} + 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) (1 - \varphi) - \delta + H \right] \quad (2.14)$$

Система рівнянь містить кілька невідомих, тож для однозначного розв'язання потрібно задати додаткові конструктивні обмеження. Зокрема, задають відношення висоти бункера до його діаметра:

$$h_2 = D_2 \cdot c \quad (2.15)$$

де h_2 – висота циліндричної частини бункера, м;

D_2 – діаметр циліндричної частини бункера, м;

c – відношення загальної висоти бункера до його діаметра.

З урахуванням необхідного технологічного об'єму змішувача та коефіцієнта заповнення діаметр D_2 визначають так:

$$D_2 = \sqrt{\frac{4V_3}{\pi c \phi^3}} \quad (2.16)$$

У результаті розрахунків отримано $D_2 \approx 396$ мм; для подальшого проєктування діаметр округлюють до стандартного значення 400 мм.

Величину радіального зазору між корпусом і лопаттю δ з точки зору зниження енергоємності доцільно приймати в межах 15–50 мм. Для розрахунків приймаємо $\delta = 30$ мм.

За граничних умов формування псевдозрідженого шару параметр H_b має верхню межу інтервалу (2.2), тобто $H_b = 10$. Тоді, виходячи зі співвідношень геометричних параметрів, ширину лопаті можна записати як:

$$b = \frac{(D_2 c - (b + 2\delta))\phi}{H_b} \quad (2.17)$$

(у подальших перетвореннях це рівняння використовують разом із (2.7)).

Після спільного розв'язання співвідношень (2.7) і (2.17) висоту конічної частини бункера виражають як:

$$h_1 = \frac{(D_2 c - (b + 2\delta))\phi}{H_b + 2\delta} \quad (2.18)$$

Підставивши числові значення ($D_2 = 0,4$ м, $\phi = 0,6$, $H_b = 10$, $\delta = 0,03$ м), одержують раціональні розміри бункера та лопаті, за яких забезпечуються умови формування псевдозрідженого шару комбікорму з урахуванням фізико-механічних властивостей матеріалу і виробничих умов ферми.

2.3 Визначення енергетичних показників процесу

Розглянемо зміну швидкості окремої частинки в процесі змішування, коли вона потрапляє в псевдозріджений шар і взаємодіє з лопаттю мішалки. Згідно з теоремою про зміну кількості руху:

$$S = m\Delta v \quad (2.19)$$

де \bar{S} – імпульс сили;

m – маса частинки;

$\Delta\bar{v}$ – зміна вектора швидкості.

У розрахунках частинку умовно вважають сферою середнього діаметра D_{cp} . Для монофракційних сферичних частинок максимальна щільність упаковки при гексагональній укладці характеризується коефіцієнтом заповнення простору:

$$k_3 = \frac{\pi}{\sqrt{18}} \quad (2.20)$$

Масу однієї частинки визначають через її об'єм і насипну густину:

$$m_{\text{ч}} = V_{\text{ч}}\rho_{\text{н}} \quad (2.21)$$

де $m_{\text{ч}}$ – маса окремої частинки, кг;

$V_{\text{ч}}$ – об'єм окремої частинки, м³;

$\rho_{\text{н}}$ – насипна густина суміші, кг/м³.

Після перетворення (2.20) і (2.21) одержуємо:

$$m_{\text{ч}} = \frac{D_{cp}^3 \rho_{\text{н}} \sqrt{18}}{6} \quad (2.22)$$

Швидкість переміщення частинок у шарі є одним з основних факторів, що визначають умови псевдозрідження. Окружна швидкість на краю лопаті:

$$u_0 = \frac{\pi(a + L_l)n}{30} \quad (2.23)$$

де u_0 – окружна швидкість на краю лопаті, м/с;

a – відстань від осі обертання до початку лопаті, м;

L_l – довжина лопаті, м;

n – частота обертання вала, об/хв.

Для забезпечення початку псевдозрідження приймають мінімальну окружну швидкість:

$$u_{min} \geq 8 \quad (2.24)$$

Для типової конструкції центробіжного змішувача (за даними розробника) робоча окружна швидкість на краю лопаті становить близько 18 м/с. Мінімальну частоту обертання мішалки для умов початку псевдозрідження визначають за виразом:

$$n_{min} = \frac{30u_{min}}{\pi L_l} \quad (2.25)$$

Швидкість руху частинки в радіальному напрямку під час сходу з поверхні лопаті можна описати залежністю:

$$v_q = \frac{n(a + L_l)}{2f_0} \quad (2.26)$$

де f_0 – коефіцієнт зовнішнього тертя частинок по поверхні лопаті.

На рух частинок у товщі шару впливають як умови зовнішнього та внутрішнього тертя, так і пористість суміші. Для врахування сукупної дії цих чинників вводять коефіцієнт структурно-механічного опору дисперсної системи:

$$C_s = f(f_0; f; \varepsilon_i) \quad (2.27)$$

де f – коефіцієнт внутрішнього тертя;

ε_i – пористість шару багатокомпонентної суміші.

Пористість ε характеризує частку пор у загальному об'ємі матеріалу й пов'язана з гранулометричним складом. З урахуванням тетраедричної або кубічної упаковки сферичних частинок пористість можна подати у вигляді:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi}{6} (1 - \cos \gamma) \sqrt{1 + 2 \cos \gamma} \quad (2.28)$$

де γ – кут між відрізками, що з'єднують центри сусідніх частинок, град. (60° для гексагональної укладки до 90° для кубічної).

Для полідисперсних сумішей вводять коефіцієнт неоднорідності гранулометричного складу:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2.29)$$

де d_{60} – діаметр частинок, менших за який міститься 60 % суміші, м;

d_{10} – діаметр частинок, менших за який міститься 10 % суміші, м.

Тоді пористість багатокомпонентної суміші:

$$\varepsilon_i = \frac{\varepsilon}{C_u} \quad (2.30)$$

а коефіцієнт структурно-механічного опору набуває вигляду:

$$C_s = \frac{\varepsilon_i}{f_0 \cdot f} \quad (2.31)$$

Радіальний рух частинки під дією лопаті зумовлений відцентровою силою:

$$F_g = m\omega^2 r \quad (2.32)$$

де ω – кутова швидкість обертання, с^{-1} ;

r – поточний радіус траєкторії частинки, м.

На рис. 2.7 подано розрахункову схему векторів сил і швидкостей у момент сходу частинки з лопаті.

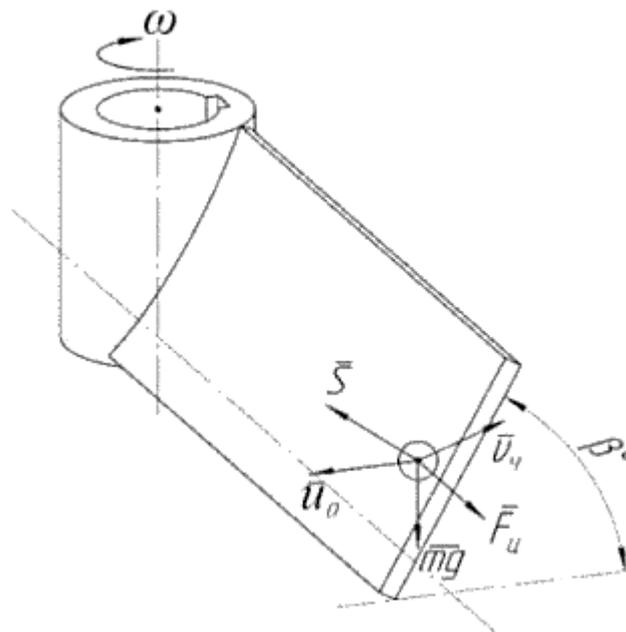


Рисунок 2.7 – Розрахункова схема дії сил і швидкостей на частинку суміші під час її сходу з лопаті мішалки

Беручи до уваги (2.26) і (2.32) та включаючи в вираз коефіцієнт C_s , швидкість сходу частинки з лопаті з урахуванням структурно-механічних властивостей суміші можна записати як:

$$v_{\text{ч}} = \frac{\pi n(a + L_{\text{л}})\varepsilon_i \sin \beta_L}{30 f_0 f} \quad (2.33)$$

де β_L – кут нахилу лопаті мішалки до горизонту.

Енергія, необхідна для переведення частинки масою $m_{\text{ч}}$ зі стану спокою в рух із швидкістю $v_{\text{ч}}$, дорівнює:

$$E_1 = \frac{D_{\text{сп}}^3 \rho_{\text{н}} k_3}{12}, C_s \left(\frac{\pi n(a + L_{\text{л}})\varepsilon_i \sin \beta_L}{30 f_0 f} \right)^2 \quad (2.34)$$

Цей вираз описує витрати енергії на формування псевдозрідженого стану з урахуванням розмірів частинок, фізико-механічних властивостей матеріалу та параметрів змішувача комбікормів.

Для оцінки загальних витрат енергії на переміщення шару матеріалу враховують масу шару, який одночасно захоплюється лопатями. Масу цього шару визначають через його об'єм:

$$m_c = \rho_{\text{н}} V_c \quad (2.35)$$

де V_c – об'єм шару, що переміщується мішалкою, м³.

Об'єм шару виражається через площу S_c і ефективну ширину захоплення:

$$V_c = S_c b \sin \beta_L \quad (2.36)$$

Площа S_c є площею кільцевого шару:

$$S_c = \pi \left((L_{\text{л}} + a)^2 - a^2 \right) \quad (2.37)$$

З огляду на зв'язність частинок між собою вводять характеристику границі зсуву на верхній межі шару:

$$\tau_h = F_h f \quad (2.38)$$

де F_h – аутогезія (нормальний тиск на верхній границі шару), Па.

Аутогезія чисельно дорівнює нормальному напруженню на верхній границі шару:

$$F_h = \frac{V_h \rho_n g}{S_c} \quad (2.39)$$

де V_h – об'єм шару над мішалкою, м³;

g – прискорення вільного падіння.

Об'єм V_h :

$$V_h = S_c H_h \quad (2.40)$$

де H_h – висота шару над лопатями, м.

Після підстановки (2.39) і (2.40) у (2.38) одержують граничну характеристику напруженого стану шару:

$$P_\tau = 2H_h \rho_n g f \quad (2.41)$$

З урахуванням (2.35) та (2.40) енергія, що витрачається на подолання зв'язності дисперсної системи в шарі, який переміщується мішалкою:

$$E_\tau = 2H_h \rho_n g f S_c b \sin \beta_L \quad (2.42)$$

Загальні витрати енергії на формування псевдозрідженого шару з урахуванням структурно-механічних характеристик матеріалу:

$$E_c = \frac{\rho_n V_c \left(\frac{\pi n (L_l + a) \varepsilon_i \sin \beta_L}{30 f_0 f} \right)^2}{2 C_s} + 2 H_h \rho_n g f S_c b \sin \beta_L \quad (2.43)$$

На основі (2.43) отримують вираз для потужності, необхідної для підтримання умов псевдозрідженого змішування:

$$N_c = \left[\rho_n V_c^2 C_s \left(\frac{\pi n (L_l + a) \varepsilon_i \sin \beta_L}{30 f_0 f} \right)^2 + 2 H_h \rho_n g f S_c b \sin \beta_L \right] \omega \quad (2.44)$$

де

N_c – потужність, необхідна для підтримання псевдозрідженого режиму змішування, кВт;

ρ_n – насипна густина суміші, кг/м³;

V_c – об'єм шару, що переміщується мішалкою, м³;

C_s – коефіцієнт структурно-механічного опору;

π – математична стала;

n – частота обертання вала, об/хв;

L_l – довжина лопаті, м;

a – відстань від осі до початку лопаті, м;

ε_i – пористість багатокомпонентної суміші;

β_L – кут нахилу лопаті;

f_0 – коефіцієнт зовнішнього тертя;

f – коефіцієнт внутрішнього тертя;

H_h – висота шару над лопатями, м;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

S_c – площа кільцевого перерізу шару, м²;

b – висота лопаті, м;

ω – кутова швидкість обертання вала, с⁻¹.

Графічний аналіз (2.44) для швидкості на краю лопаті $u_0 = 8$ м/с (швидкість початку псевдозрідження) наведено на рис. 2.8.

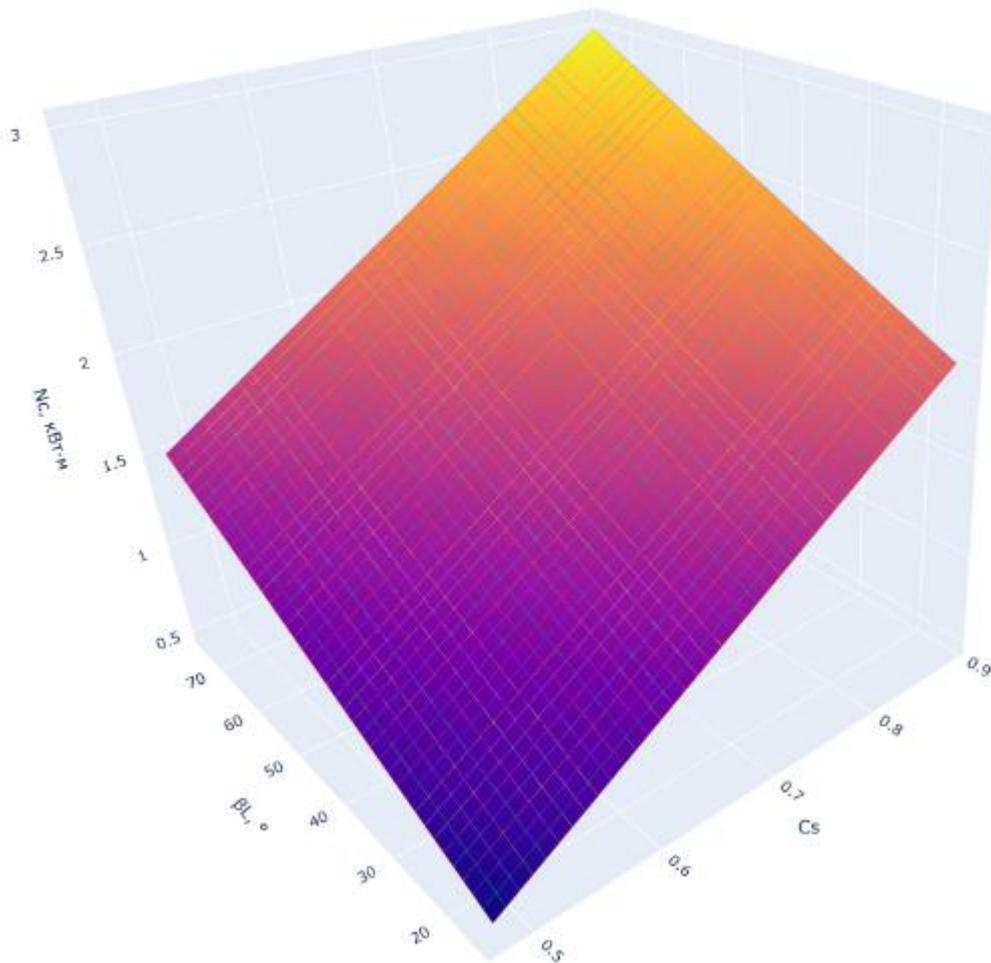


Рисунок 2.8 – Залежність потужності від структурно-механічного опору шару комбікорму та кута нахилу лопаті

Із графіка видно, що зі зростанням коефіцієнта структурно-механічного опору (ущільнення шару, зменшення пористості) потрібна потужність зменшується, а зі збільшенням кута нахилу лопаті від 30° до 60° – зростає, що відбиває збільшення сил опору з боку матеріалу.

2.4 Висновки

1. На основі аналізу процесу змішування в псевдозрідженому шарі та геометричних співвідношень бункера отримано залежності й визначено конструктивні параметри змішувача комбікормів (розміри бункера та лопаті, кут природного укосу, коефіцієнт заповнення), які забезпечують формування

псевдозрідженого стану з урахуванням фізико-механічних властивостей комбікормів і виробничих умов молочнотоварних ферм.

2. Отримано узагальнену залежність (2.44), яка описує потужність, необхідну для формування псевдозрідженого шару, з урахуванням структурно-механічних характеристик суміші та параметрів змішувача. Показано, що:

- при куті нахилу лопаті 30° і коефіцієнті структурно-механічного опору $C_s \approx 0,89$ потужність становить близько $0,72$ кВт;
- при куті 60° і $C_s \approx 0,48$ потужність зростає до $\approx 2,41$ кВт;
- при $C_s \approx 0,79$ і куті 45° потужність становить $\approx 1,37$ кВт.

Збільшення потрібної потужності за зменшення C_s пов'язане з ущільненням шару (зростанням сил взаємодії між частинками), а підвищення кута нахилу лопаті від 30° до 60° приводить до зростання необхідної потужності приблизно на 45–55 % залежно від структурно-механічного опору матеріалу.

3 Експериментальні дослідження змішувача

3.1 Загальні положення

Змішування є складним багатофакторним процесом, ефективність якого визначається конструктивними параметрами та режимами роботи змішувача, а також фізико-механічними властивостями матеріалу, що змішується. Формування якості суміші відбувається в результаті одночасного перебігу трьох елементарних процесів: конвективного змішування, дифузійного змішування та сегрегації.

На початковій стадії переважає конвективне змішування, швидкість якого в основному залежить від конструкції змішувача та характеру руху матеріалу. Цей процес відбувається на рівні макрооб'ємів і майже не пов'язаний з фізико-механічними властивостями окремих компонентів. Після того як перерозподіл частинок починає здійснюватися вже в межах мікрооб'ємів, провідним стає дифузійне змішування, під час якого частинки різних компонентів переходять через знову утворені межі їх розділу. На подальших етапах усе більший вплив на загальний результат чинить сегрегація, що проявляється в локальному накопиченні частинок окремих компонентів під дією зовнішніх сил. У певний момент процеси дифузійного змішування та сегрегації урівноважуються, і подальше збільшення тривалості змішування вже не покращує однорідність суміші.

Залежність впливу зазначених елементарних процесів на якість суміші ілюструє графік на рисунку 3.1. Першій ділянці кривої відповідає зона переважання конвективного змішування. Друга ділянка характеризує область інтенсивного дифузійного змішування. На третій ділянці процеси дифузійного змішування та сегрегації врівноважуються.

Швидкість дифузійного змішування та сегрегації визначається фізико-механічними властивостями компонентів суміші та характером їх руху. Такі показники, як гранулометричний склад і насипна густина, значною мірою

зумовлюють схильність компонентів до сегрегації під час змішування. Відмінності у розподілі за розміром частинок та їх насипною густиною сприяють просипанню більш дрібних і важчих фракцій крізь шар крупніших і легших, що приводить до розшарування суміші на фракції. Гранулометричні характеристики визначають також питому площу поверхні поділу фаз. Угли природного укосу та обвалення відображають рухливість матеріалу. Для сумішей сипких компонентів з однаковими фізико-механічними властивостями дифузійний механізм змішування практично не проявляється.

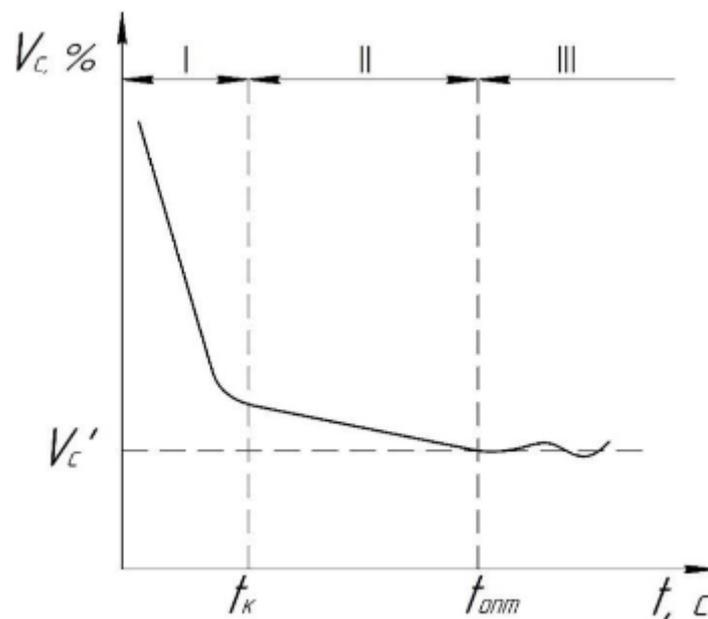


Рисунок 3.1 – Залежність коефіцієнта неоднорідності суміші від часу змішування

Для кожного типу змішувача існує оптимальна тривалість змішування $t_{опт}$, після закінчення якої досягається найкраща однорідність суміші V_c' за мінімальної питомої енергоємності процесу. Оптимальний час змішування залежить також від фізико-механічних властивостей матеріалу. Тому до завдань експериментальних досліджень належать: визначення фізико-механічних властивостей сучасних комбікормів та встановлення раціональних параметрів і режимів роботи змішувача для їх ефективного змішування.

3.2 Методика визначення раціональних параметрів змішувача

У межах програми досліджень змішувача комбікормів були сформульовані мета та завдання.

Мета досліджень – визначення раціональних параметрів і режимів роботи змішувача комбікормів, які забезпечують одержання якісних кормових сумішей.

Завдання досліджень:

- визначити раціональну окружну швидкість на краю лопаті мішалки;
- визначити раціональну тривалість змішування;
- визначити раціональний кут нахилу лопаті.

За нижній рівень варіювання окружної швидкості на краю лопаті приймають її мінімальне значення, яке відповідає початку псевдозрідження шару матеріалу: $u_0 = 8$ м/с, при цьому частота обертання мішалки становить 450 хв⁻¹. За нульовий рівень приймають значення: $u_0 = 9,5$ м/с (534 хв⁻¹), а за верхній рівень: $u_0 = 11$ м/с (618 хв⁻¹).

На основі проведених пошукових експериментів щодо визначення інтервалу варіювання тривалості змішування: за нижній рівень прийнято $t = 30$ с, за верхній рівень – $t = 150$ с, за нульовий рівень – $t = 90$ с.

З урахуванням результатів теоретичних досліджень та аналізу наявних експериментальних даних: за нижній рівень кута нахилу лопаті прийнято $\beta_L = 30^\circ$, за нульовий рівень – $\beta_L = 45^\circ$, за верхній рівень – $\beta_L = 60^\circ$.

Експериментальні дослідження виконувалися з використанням трирівневого плану Бокса–Бенкена. Некомпозиційні плани другого порядку Бокса–Бенкена є більш економними за кількістю дослідів порівняно з відповідними ортогональними та ротатабельними планами при збереженні достатньої інформативності.

У таблиці 3.1 наведено досліджувані фактори, їх кодовані позначення та рівні варіювання.

Таблиця 3.1 – Фактори, що підлягають дослідженню, та рівні їх варіювання

Фактори	Кодоване позначення	Рівні факторів			Інтервал варіювання
		-1	0	+1	
Колова швидкість на краю лопаті u_0 , м/с	X_1	8	9,5	11	1,5
Час змішування t , с	X_2	30	90	150	60
Кут установлення лопаті β_L , градуси	X_3	30	45	60	15

Для проведення експериментальних досліджень з визначення раціональних параметрів і режимів змішування комбікормів була виготовлена експериментальна установка змішувача (рисунок 3.2). За принципом дії установка належить до змішувачів періодичної дії.



1 – бункер; 2 – лоток для вивантаження; 3 – привід; 4 – рама; 5 – блок керування; 6 – панель керування.

Рисунок 3.2 – Експериментальна установка змішувача комбікормів

Основні технічні характеристики установки:

габаритні розміри – 820×450×1310 мм;

корисний об'єм змішувальної камери – 0,044 м³;

потужність приводу – 5,5 кВт;

маса установки – 68 кг.

Робота установки відбувається так. Змішуваний матеріал завантажують у бункер 1 у довільній послідовності. На блоці керування 5 за допомогою панелі керування 6 задається потрібна частота обертання приводу 3 відповідно до плану експерименту. Після цього вмикають привід, і розпочинається процес змішування.

Тривалість змішування встановлюють згідно з планом досліду і контролюють секундоміром. Після закінчення процесу змішування матеріал вивантажують через лоток 2.

Результати експериментальних досліджень параметрів і режимів роботи змішувача комбікормів

Для визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів змішувача та більш детального вивчення робочого процесу були проведені експериментальні дослідження із застосуванням методики планування багатофакторного експерименту за трирівневим планом Бокса–Бенкена. Досліди виконували за рандомізованою матрицею планування (таблиця 3.5) з трикратною повторюваністю.

В усіх дослідах суміш мала загальну масу 27,27 кг і складалася з 27,0 кг основного компонента та 0,27 кг (1 %) ключового компонента. Спочатку в змішувач завантажували основний компонент, після чого додавали ключовий (рисунок 3.3).

Після завантаження компонентів розпочинали процес змішування. По завершенні змішування відбирали проби. За одну операцію точкового відбору формували дві проби – з нижнього та верхнього шарів суміші. Відібрані проби поміщали в окремі герметичні ємності для подальшого аналізу. Під час аналізу

кожну пробу зважували, потім розділяли на основний і ключовий компоненти; отримані частки знову зважували з точністю до 0,1 г.



Рисунок 3.3 – Завантаження компонентів суміші

3.3 Результати досліджень

У результаті обробки експериментальних даних за методами теорії планування експерименту були отримані регресійні моделі, що описують залежність коефіцієнта неоднорідності суміші та енергоємності процесу змішування від параметрів і режимів роботи змішувача комбікормів:

Для коефіцієнта неоднорідності суміші V_c (%):

$$Y_1 = 7.72077 - 9.955X_1 - 4.315X_2 - 5.155X_3 + 9.59115X_1^2 + 2.7425X_1X_2 + 6.6425X_1X_3 + 5.32115X_2^2 + 2.6675X_2X_3 \quad (3.1)$$

Для енергоємності процесу змішування E_i (кВт·год/т):

$$Y_2 = 3.04769 - 0.575X_1 + 2.105X_2 - 0.605X_3 + 0.0615385X_1^2 - 0.3825X_1X_2 + 0.1025X_1X_3 - 0.4025X_2X_3 + 0.171538X_3^2 \quad (3.2)$$

За цими рівняннями регресії побудовано тривимірні поверхні відгуку, що відображають вплив досліджуваних факторів на коефіцієнт неоднорідності

суміші (рисунок 3.4) та енергоємність процесу змішування (рисунок 3.5) у розкодованому вигляді: $V_c = f(u_0, \beta_L), E_i = f(u_0, \beta_L)$

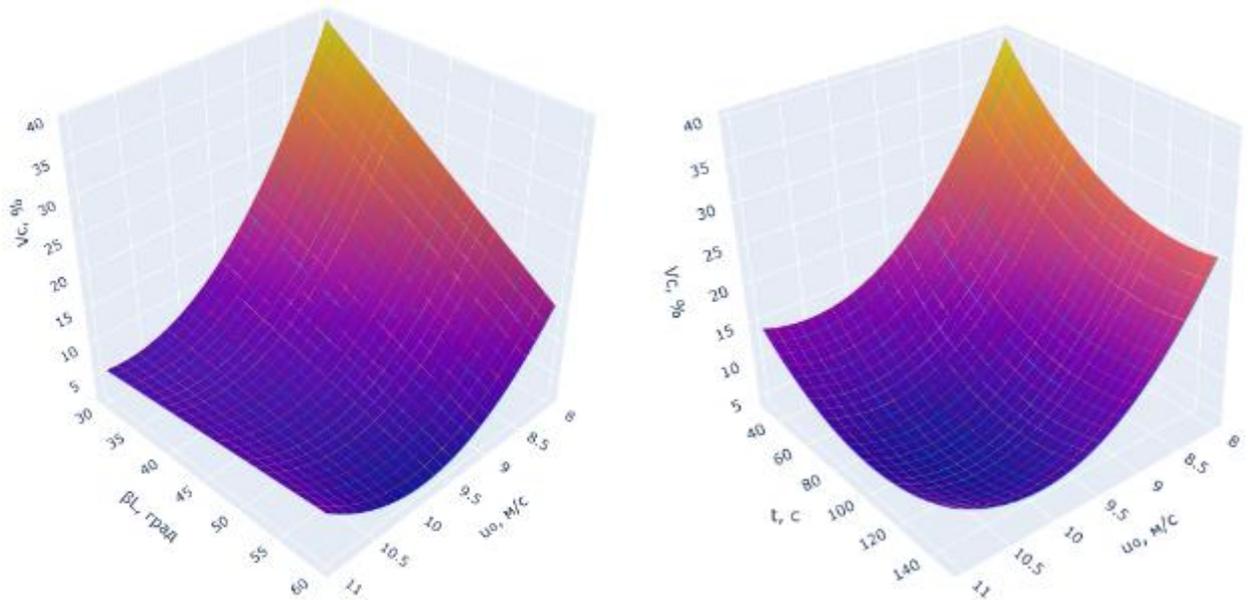


Рисунок 3.4 – Поверхні відгуку впливу окружної швидкості на краю лопаті u_0 (м/с), кута нахилу лопаті β_L (град) і часу змішування t (с) на коефіцієнт неоднорідності суміші V_c (%)

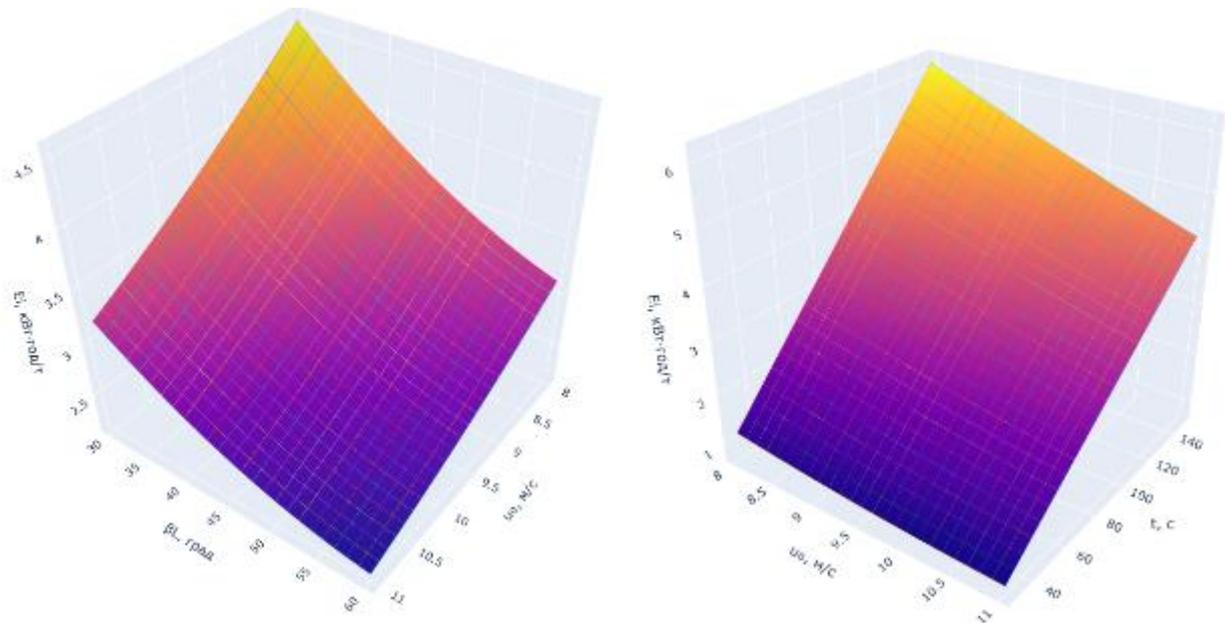


Рисунок 3.5 – Поверхні відгуку впливу окружної швидкості на краю лопаті u_0 (м/с), кута нахилу лопаті β_L (град) і часу змішування t (с) на енергоємність процесу змішування E_i (кВт·год/т)

Аналіз результатів показав, що найбільший вплив на якість суміші має окружна швидкість на краю лопаті. Збільшення кута встановлення лопаті також позитивно позначається на однорідності суміші. Зменшення коефіцієнта неоднорідності V_c спостерігається лише до певного значення тривалості змішування, подальше збільшення часу не покращує якість. Найкращий показник однорідності суміші $V_c = 6,58\%$ досягається за таких параметрів:

- окружна швидкість $u_0 = 9,5$ м/с,
- час змішування $t = 90$ с,
- кут нахилу лопаті $\beta L = 45^\circ$.

Енергоємність процесу змішування у більшій мірі залежить від часу змішування та кута встановлення лопаті. Мінімальне значення енергоємності $E_i = 0,54$ кВт·год/т досягається при:

- $u_0 = 9,5$ м/с,
- $t = 30$ с,
- $\beta L = 30^\circ$.

Дослідження також показали, що зі збільшенням окружної швидкості на краю лопаті енергоємність змішування зменшується. Це пов'язано зі зниженням структурно-механічного опору шару матеріалу внаслідок збільшення його пористості.

Для пошуку оптимальних параметрів і режимів роботи змішувача було застосовано методи нелінійного програмування. Задачу оптимізації записували у вигляді системи:

$$\begin{cases} V_c = f(X_1, X_2, X_3) \leq 10\%, \\ E_i = f(X_1, X_2, X_3) \rightarrow \min, \\ -1 \leq X_1 \leq 1, \\ -1 \leq X_2 \leq 1, \\ -1 \leq X_3 \leq 1. \end{cases} \quad (3.3)$$

На основі аналізу математичних моделей (3.1) та (3.2) була розв'язана компромісна задача - визначити такі значення факторів, за яких коефіцієнт

неоднорідності суміші відповідає зоотехнічним вимогам ($V_c \leq 10\%$) при мінімальній енергоємності змішування. Процедура розв'язання компромісної задачі дає змогу знайти оптимальне значення цільової функції, змінюючи групу параметрів, які прямо чи опосередковано впливають на результат. Для звуження діапазону можливих значень у моделі накладають обмеження на змінні та кінцеві параметри, що визначаються на етапі постановки задачі.

Розв'язання задачі оптимізації параметрів і режимів роботи змішувача виконували на ЕОМ із використанням статистичного графічного пакета Statgraphics 19. На рисунку 4.14 наведено контурні лінії перерізу поверхні відгуку, отримані під час розв'язання оптимізаційної задачі.

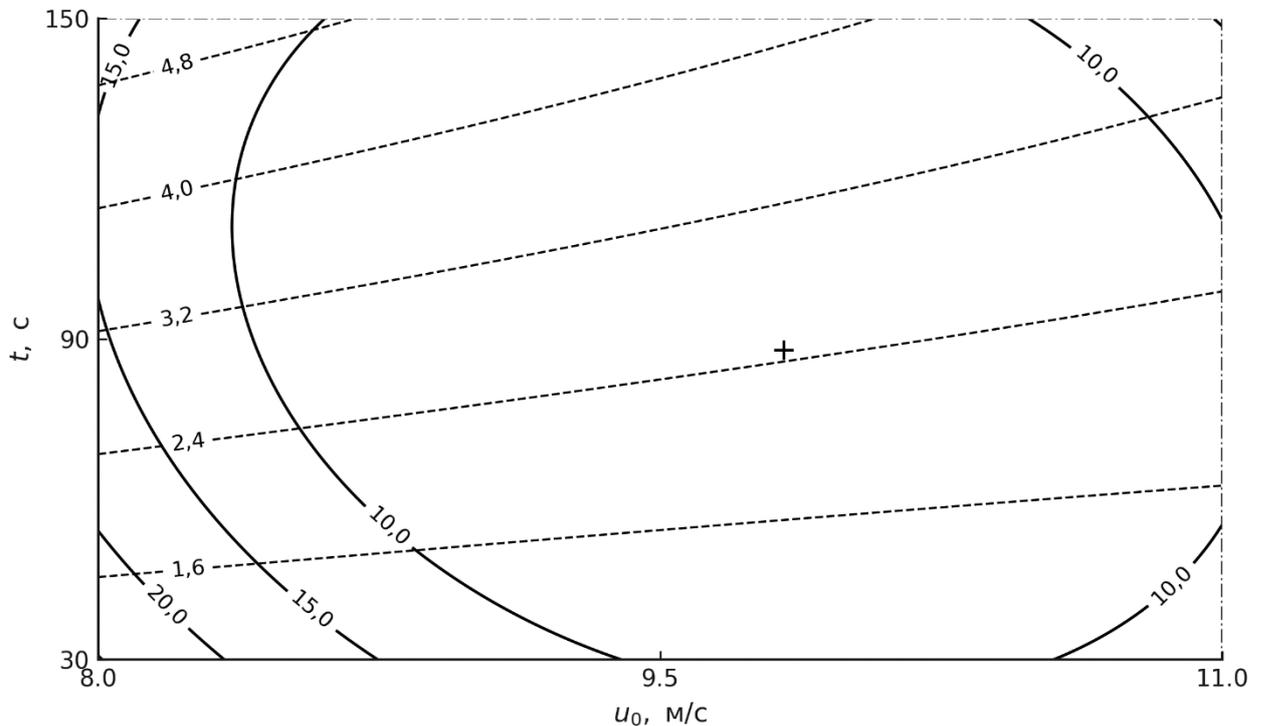


Рисунок 4.14 – Контурні лінії перерізу поверхні відгуку при розв'язанні оптимізаційної задачі

Отримані результати дали змогу зробити висновок, що оптимальні параметри та режими роботи змішувача, які забезпечують виконання зоотехнічних вимог щодо однорідності суміші ($V_c \leq 10\%$) при мінімальній енергоємності процесу, мають такі значення:

- окружна швидкість на краю лопаті $u_0 = 9,83$ м/с;
- час змішування $t = 88$ с;
- кут установлення лопаті $\beta_L = 60^\circ$.

При цьому:

- коефіцієнт неоднорідності суміші становить $V_c = 2,51$ %;
- енергоємність змішування - $E_i = 2,31$ кВт·год/т.

3.4 Висновки

Проведено експериментальні дослідження впливу параметрів і режимів роботи змішувача на однорідність суміші та питому енергоємність процесу змішування. Частка ключового компонента становила 1 % (0,27 кг) відносно маси основного компонента (27,0 кг).

Отримано математичну модель (3.1), яка описує вплив окружної швидкості на краю лопаті u_0 (м/с), кута нахилу лопаті β_L (град) і часу змішування t (с) на коефіцієнт неоднорідності суміші V_c (%).

Отримано математичну модель (3.2), що характеризує вплив окружної швидкості на краю лопаті u_0 (м/с), кута нахилу лопаті β_L (град) і часу змішування t (с) на питому енергоємність процесу змішування E_i (кВт·год/т).

Розв'язано задачу оптимізації параметрів і режимів роботи змішувача для досягнення коефіцієнта неоднорідності суміші, який відповідає зоотехнічним вимогам ($V_c \leq 10\%$), за умови мінімальної питомої енергоємності змішування. Встановлено, що оптимальними є такі значення:

- окружна швидкість на краю лопаті $u_0=9,83$ м/с;
- час змішування $t=88$ с;
- кут установлення лопаті $\beta_L=60^\circ$.

За цих параметрів коефіцієнт неоднорідності суміші становить $V_c=2,51\%$, а питома енергоємність змішування - $E_i=2,31$ кВт·год/т.

4 Охорона праці

4.1 Загальні вимоги охорони праці при приготуванні комбікормів

Процес приготування комбікормів супроводжується низкою небезпечних і шкідливих виробничих факторів: рухомі частини машин і механізмів, підвищена запиленість повітря робочої зони, підвищений рівень шуму та вібрації, можливість ураження електричним струмом, значні фізичні навантаження під час ручних вантажно-розвантажувальних робіт. Тому організація робіт повинна відповідати вимогам чинного законодавства України з охорони праці, а також галузевих нормативів і стандартів, що регламентують безпечну експлуатацію технологічного обладнання на підприємствах АПК.

Основні загальні вимоги:

– до роботи на лінії приготування комбікормів допускаються особи не молодші 18 років, які пройшли попередній медичний огляд, вступний, первинний та повторний інструктажі з охорони праці, навчання й перевірку знань безпечних методів роботи;

– працівник повинен бути забезпечений засобами індивідуального захисту (ЗІЗ): спецодягом (халат/комбінезон із щільної тканини), спецвзуттям із нековзною підошвою, захисними окулярами або щитком, рукавицями, протишумовими навушниками або вкладишами, респіратором (або фільтрувальною напівмаскою) при роботі в запиленому середовищі;

– приміщення комбікормоцеху має бути обладнане припливно-витяжною вентиляцією, що забезпечує видалення пилу й нормований повітрообмін; рівень шуму в робочій зоні не повинен перевищувати встановлені санітарні норми;

– усі машини та механізми (дробарки, транспортери, змішувачі тощо) повинні мати справні захисні кожухи на рухомих і обертових частинах (вали, муфти, ремінні та ланцюгові передачі), блокування відкривання люків та кришок під час роботи, чітке маркування органів керування;

– електрообладнання має відповідати класу середовища (запилені приміщення), бути заземленим; пускові апарати й шафи керування

розміщуються в доступних для обслуговування, але захищених від випадкового дотику місцях;

- проходи й робочі місця повинні бути вільними від сировини, тари й сторонніх предметів; підлога - рівною, не слизькою, за можливості з покриттям, що полегшує прибирання пилу;

- вантажно-розвантажувальні роботи організують з максимальною механізацією (транспортери, візки, підйомники); маса вантажу для ручного перенесення не повинна перевищувати норм, установлених для чоловіків і жінок;

- у приміщенні мають бути передбачені засоби пожежогасіння (вогнегасники порошкові/вуглекислотні, ящик із піском, протипожежний інвентар), евакуаційні виходи, плани евакуації та інструкції про порядок дій у разі пожежі та аварій.

Забороняється працювати на обладнанні із несправними блокуваннями, огорожами та заземленням, а також експлуатувати машини з підвищеною вібрацією, стороннім шумом, видимими пошкодженнями робочих органів, електрокабелів та арматури.

4.2 Оцінка з точки зору охорони праці розробленого змішувача

Розроблений змішувач комбікормів є обладнанням періодичної дії з вертикальним (або горизонтальним - підставити за фактом) валом і лопатевим робочим органом, розміщеним у закритому бункері. При проєктуванні враховано вимоги безпечної експлуатації:

- корпус змішувача виконаний герметичним, із кришкою, що щільно прилягає, що знижує запиленість у робочому приміщенні;

- завантажувальні й розвантажувальні люки мають механізми фіксації у закритому положенні; їх відкривання під час роботи змішувача не допускається;

- приводний електродвигун і ремінна передача (якщо застосовано) закриті суцільними або перфорованими металевими кожухами, що унеможливають потрапляння одягу та частин тіла в зону рухомих елементів;

- передбачено зручне розташування органів керування на панелі управління: кнопки «Пуск», «Стоп», аварійне відключення, індикація режимів роботи (частота обертання, час змішування);

- електродвигун змішувача заземлений, підключення здійснюється через окремих автоматичний вимикач і пристрій захисного відключення (ПЗВ / УЗО) відповідного номіналу;

- монтаж змішувача на жорсткій рамі та використання демпфувальних елементів знижують рівень вібрації та шуму, що позитивно впливає на умови праці оператора.

До потенційно небезпечних факторів, характерних саме для цього змішувача, належать:

- ризик травмування при обслуговуванні робочого органу (очищення, ремонт, заміна лопатей) у разі недотримання вимог блокування й електробезпеки;

- вплив пилу при завантаженні сухих компонентів (за недостатньої вентиляції або відсутності локальних відсмоктувачів).

З урахуванням передбачених конструктивних заходів безпеки та за умови дотримання інструкції з охорони праці, розроблений змішувач може бути рекомендований до застосування в складі лінії приготування комбікормів без додаткових обмежень.

4.3 Проєкт інструкції з охорони праці оператора змішувача

1 Загальні положення

Інструкція встановлює вимоги охорони праці для оператора змішувача комбікормів (далі - оператор).

До роботи допускаються особи не молодші 18 років, які пройшли медогляд, вступний інструктаж з охорони праці, первинний інструктаж на робочому місці, навчання безпечним прийомам роботи та перевірку знань.

Оператор повинен знати: будову змішувача, призначення органів керування, порядок запуску й зупинки, правила користування ЗІЗ, дії у разі аварійних ситуацій.

Оператор зобов'язаний виконувати вимоги цієї інструкції, внутрішнього трудового розпорядку, правил пожежної безпеки та виробничої санітарії.

За невиконання вимог інструкції працівник несе відповідальність згідно з чинним законодавством та внутрішніми положеннями підприємства.

2 Вимоги безпеки перед початком роботи

Прийти на роботу в справному спецодязі, спецвзутті, підготувати необхідні ЗІЗ: респіратор (при роботі з пиловими компонентами), захисні окуляри, рукавиці, протишумові навушники (за необхідності).

Переконатися у відсутності сторонніх предметів у зоні змішувача, прохідності проходів, справності освітлення.

Оглянути стан змішувача:

перевірити цілісність корпусу, кришки, завантажувальних і розвантажувальних люків;

переконатися у наявності та справності захисних кожухів приводу і ремінних/ланцюгових передач;

перевірити, чи немає слідів пошкодження кабелів, розеток, пускової апаратури.

Переконатися у справності заземлення (наявність і цілісність заземлювального провідника, відсутність самовільних підключень).

Перевірити роботу органів керування без завантаження: короткочасно ввімкнути змішувач, переконатися в відсутності стороннього шуму, вібрації, іскріння, перегріву електрообладнання, справності кнопки «Стоп» і аварійного відключення.

Підготувати сировину: перевірити цілісність тари, наявність маркування, відсутність сторонніх домішок у компонентах.

3 Вимоги безпеки під час роботи

Завантаження компонентів здійснювати тільки при зупиненому змішувачі, через передбачені для цього завантажувальні отвори; не допускати перевищення паспортної місткості.

Забороняється відкривати кришку змішувача, завантажувальні або розвантажувальні люки під час роботи робочого органу.

Забороняється руками або предметами проштовхувати сировину в горловину, проникати всередину бункера при обертювих лопатях.

Пуск змішувача здійснювати з пульта керування: переконатися, що всі люди відійшли від рухомих частин, подати попереджувальний сигнал (якщо передбачено).

У процесі роботи контролювати:

відсутність підтікання матеріалу з бункера й завантажувальних/розвантажувальних вузлів;

рівень шуму та вібрації, температуру електродвигуна;

правильність індикації часу змішування та частоти обертання (якщо передбачено системою керування).

При виявленні незвичайного шуму, запаху гару, вібрації, збою в роботі приводу негайно зупинити змішувач кнопкою «Стоп», при необхідності - аварійною кнопкою, відключити живлення.

Очищення зовнішніх поверхонь змішувача від пилу, прибирання підлоги в зоні обслуговування дозволяється лише при зупиненому обладнанні; застосовувати вологе прибирання або пилосос промислового типу, а не сухе змітання.

Забороняється самостійно розбирати електрообладнання, усувати несправності, пов'язані з електричною частиною, - про всі порушення повідомляти відповідальному спеціалісту (електромонтеру, механіку).

4 Вимоги безпеки після закінчення роботи

Після завершення змішування повністю вивантажити готову суміш із бункера через розвантажувальний люк.

Зупинити змішувач штатною кнопкою «Стоп», відключити живлення автоматичним вимикачем (рубильником).

Провести очищення внутрішньої поверхні бункера від залишків комбікорму тільки після повної зупинки робочого органу й відключення від мережі. При необхідності застосовувати щітки, скребки з неметалевими робочими частинами; не використовувати ударний інструмент, що може пошкодити корпус.

Прибрати робоче місце, закрити мішки з сировиною та готовим комбікормом, забезпечити їх зберігання у відведеному місці.

Зняти ЗІЗ, очистити від пилу, розмістити в індивідуальній шафі (камері зберігання).

Повідомити безпосереднього керівника про всі виявлені за зміну несправності або незвичайні ситуації.

5 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

У разі раптового виходу з ладу змішувача, появи диму, іскор, стороннього шуму - негайно зупинити роботу, відключити електроживлення, повідомити керівника та відповідальних спеціалістів.

При загорянні електрообладнання або пилу використовувати тільки вуглекислотні або порошкові вогнегасники; забороняється гасити електроустановки, що перебувають під напругою, водою або пінними вогнегасниками.

У разі травмування негайно надати потерпілому першу домедичну допомогу, викликати швидку медичну допомогу, повідомити керівництво.

При аварійному виділенні великої кількості пилу (розрив мішка, розсипання компонентів) необхідно зупинити змішувач, перекрити подачу сировини, організувати прибирання з використанням ЗІЗ органів дихання і запобігати утворенню вибухонебезпечних пилоповітряних сумішей.

4.4 Висновки

Встановлено, що процес приготування комбікормів супроводжується комплексом небезпечних і шкідливих виробничих факторів (рухомі частини машин, пил, шум, вібрація, небезпека ураження електричним струмом), що

потребує чіткої організації робочого місця, застосування колективних і індивідуальних засобів захисту, а також дотримання вимог нормативних документів з охорони праці та пожежної безпеки.

Розроблений змішувач комбікормів конструктивно враховує вимоги безпеки: герметичний корпус, наявність захисних кожухів приводів, зручна система керування, можливість монтажу на віброізолювальній рамі, заземлення електродвигуна тощо. За умови виконання регламенту обслуговування він забезпечує прийнятний рівень виробничого ризику.

Запропонований проєкт інструкції з охорони праці для оператора змішувача регламентує вимоги безпеки на всіх етапах: перед початком роботи, у процесі експлуатації, після закінчення зміни та в аварійних ситуаціях. Дотримання цих вимог мінімізує ймовірність травматизму та професійних захворювань.

5 Техніко-економічна оцінка

5.1 Вихідні дані для розрахунків

Економічну оцінку доцільності застосування розробленого змішувача сипких комбікормів виконуємо в порівнянні з базовим варіантом – серійною установкою ЗКК-12, у складі якої працює штатний змішувач. Розрахунок проводиться для умов роботи на тваринницькому підприємстві за сучасних рівнів цін на електроенергію та оплату праці.

Як базовий варіант прийнято змішувач, що входить до комплексу установки ЗКК-12, з продуктивністю 1,2 т/год і встановленою потужністю приводу 2,2 кВт. Розроблений змішувач призначений для роботи в тому самому технологічному ланцюгу, але має підвищену продуктивність 1,5 т/год при зниженій установленій потужності приводу 1,6 кВт. В обох варіантах обслуговування здійснює один оператор.

Строк служби обладнання для обох варіантів приймаємо 10 років. Нормативний коефіцієнт амортизаційних відрахувань становить 0,10 від балансової вартості на рік, коефіцієнт відрахувань на технічне обслуговування та ремонт – 0,14. Балансова вартість базового змішувача (у складі ЗКК-12) становить 93 600 грн. Для розробленого змішувача прийнято капітальні вкладення на рівні 62 500 грн, що включають виготовлення, монтаж та введення в експлуатацію.

Річне навантаження установки визначається виходячи з фактичних режимів роботи лінії. Для розробленого змішувача прийнято максимальне річне завантаження 4380 т/рік, що відповідає роботі протягом однієї зміни за умови рівномірного завантаження. Для базового змішувача при тій самій тривалості роботи річний обсяг переробки становитиме 3504 т/рік.

У розрахунках враховано сучасний рівень вартості енергоресурсів та оплати праці. Тариф на електроенергію для виробничих споживачів прийнято 6,0 грн/кВт·год. Середньомісячну заробітну плату оператора механізованої лінії приготування комбікормів прийнято на рівні 27 000 грн/міс, що відповідає

орієнтовній середній зарплаті в аграрному секторі. Нормативний місячний фонд робочого часу становить 168 год, що дає погодинну ставку близько 160,7 грн/год.

Таким чином, вихідні дані для економічних розрахунків включають: технічні характеристики базового і розробленого змішувачів (продуктивність, потужність, строк служби, обслуговуючий персонал), їхню вартість і капітальні вкладення, річне навантаження, а також економічні параметри – тариф на електроенергію, рівень оплати праці, нормативи амортизації та витрат на ремонт. На основі цих даних у подальших підрозділах виконано розрахунок питомих експлуатаційних витрат, річної економії та строку окупності впровадження розробленого змішувача.

5.2 Результати розрахунків

Аналіз даних таблиці показує, що розроблений змішувач має суттєві переваги порівняно з базовою установкою ЗКК-12. Насамперед, продуктивність підвищується з 1,2 до 1,5 т/год, тобто на 25 %, при одночасному зменшенні встановленої потужності з 2,2 до 1,6 кВт (72,7 % від базової). При незмінній чисельності обслуговуючого персоналу це означає, що на кожен тону готового продукту припадає менша частка витрат як на заробітну плату, так і на електроенергію.

Питомі експлуатаційні витрати на 1 т продукції для базового змішувача становлять близько 151,34 грн/т, тоді як для розробленого – 116,97 грн/т, що відповідає зниженню до 77,3 % від базового рівня. Найбільший ефект досягається за рахунок економії витрат на заробітну плату (з 133,93 до 107,14 грн/т) та електроенергію (з 11,00 до 6,40 грн/т). Завдяки меншій вартості обладнання зменшуються також питомі амортизаційні відрахування та витрати на ремонт і ТО. За умови річного завантаження 4380 т економія питомих експлуатаційних витрат у 34,37 грн/т забезпечує сумарну річну економію близько 150,5 тис. грн. За таких умов строк окупності капітальних вкладень у розроблений змішувач становить орієнтовно 0,42 року (менше півроку), що свідчить про високу економічну ефективність його впровадження.

Таблиця 5.2 – Показники економічної ефективності запропонованого
удосконалення

Показники	ЗКК-12 (базовий)	Розроблений змішувач	Проектний, % до базового
Продуктивність, т/год	1,2	1,5	125,0
Встановлена потужність, кВт	2,2	1,6	72,7
Обслуговуючий персонал, люди.	1	1	100,0
Балансова вартість, грн	93 600	–	–
Капітальні вкладення, грн	–	62 500	–
Питомі річні експлуатаційні витрати, грн/т	151,34	116,97	77,29
у т.ч. заробітна платня, грн/т	133,93	107,14	80,0
витрати на електроенергію, грн/т	11,00	6,40	58,2
амортизаційні відрахування, грн/т	2,67	1,43	53,4
витрати на ТО та ремонт, грн/т	3,74	2,00	53,4
Максимальне річне навантаження, т	3504	4380	125,0
Економія питомих експлуатаційних витрат, грн/т	–	34,37	–
Економія експлуатаційних витрат, грн/рік	–	150 549,4	–
Строк окупності капітальних вкладень, років	–	0,42	–

5.3 Висновки

Техніко-економічна оцінка з урахуванням сучасних тарифів на електроенергію та рівня заробітної плати показала, що експериментальний змішувач, порівняно з базовою установкою ЗКК-12, забезпечує:

- підвищення продуктивності на 25 % (1,5 проти 1,2 т/год);
- зниження встановленої потужності на 27,3 %;
- зменшення питомих експлуатаційних витрат у середньому до 77,3 % від базового рівня, у тому числі завдяки зменшенню витрат на електроенергію та оплату праці в розрахунку на 1 т продукції;
- річну економію експлуатаційних витрат близько 150,5 тис. грн за повного завантаження;
- скорочення строку окупності капітальних вкладень до 0,42 року (~5 місяців).

Загальні висновки

Виконано аналіз технологій приготування комбікормів і конструкцій змішувачів. Показано, що серійні машини не забезпечують потрібної однорідності суміші за малої частки ключового компонента при прийнятній енергоємності, що обґрунтовує необхідність розроблення нового змішувача та визначає мету й завдання роботи.

Теоретично обґрунтовано форму змішувальної камери та параметри робочого органа з урахуванням умов псевдозрідження й характеру удару частинок об стінки бункера. Отримано розрахункові залежності для визначення потужності приводу, питомої енергоємності та зв'язку геометричних і кінематичних параметрів змішувача.

Розроблено методику й проведено багатофакторний експеримент за планом Бокса–Бенкіна. На основі регресійних моделей і поверхонь відгуку визначено оптимальні режими роботи змішувача ($u_0=9,83$ м/с, $t=88$ с, $\beta L=60^\circ$), за яких коефіцієнт неоднорідності становить $V_c=2,51\%$ при питомій енергоємності $E_i=2,31$ кВт·год/т.

Оцінено безпеку застосування змішувача в умовах комбікормоцеху, виявлено основні небезпечні й шкідливі фактори та показано, що конструкція (герметичний корпус, кожухи приводу, зручна панель керування) сприяє їх зниженню. Розроблено інструкцію з охорони праці оператора, яка забезпечує безпечну експлуатацію обладнання за умови її дотримання.

Проведена техніко-економічна оцінка показала, що розроблений змішувач за продуктивності 1,5 т/год і потужності 1,6 кВт знижує питомі експлуатаційні витрати з 151,34 до 116,97 грн/т і забезпечує річну економію близько 150,5 тис. грн. Строк окупності капітальних вкладень становить $\approx 0,42$ року, що підтверджує доцільність впровадження змішувача в виробничих умовах.

Бібліографія

1. Ahmad, A. M. F. (2017). Theoretical study of energy consumption of vertical feed mixer. *International Science and Modern Engineering Technologies*, 1(10), 20–26.
2. Adusei-Bonsu, M., Dzisi, K. A., & Addo, A. (2021). Performance evaluation of mechanical feed mixers using factorial experiment. *Alexandria Engineering Journal*, 60(6), 5221–5231.
3. Ansuree, P., Kongkiatpaiboon, S., & ін. (2021). Effect of mixing speed and time on the homogeneity of sugarcane leaf mixtures. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 27(5), 1012–1020.
4. Djuragic, O., Lević, J., Sredanović, S., & Lević, L. (2009). Evaluation of homogeneity in feed by method of Microtracers®. *Archiva Zootechnica*, 12(4), 29–37.
5. Gomaa, E. M., El-Gendy, A. M., & El-Sayed, M. A. (2025). Development and performance evaluation of an animal feed mixer. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 42(1), 1–14.
6. Hogg, R. (2009). Mixing and segregation in powders: Evaluation, mechanisms and processes. *KONA Powder and Particle Journal*, 27, 3–17.
7. Iskakov, R., & Gulyarenko, A. (2025). Grinding and mixing uniformity in a feed preparation device with four-sided jagged hammers and impact-mixing mechanisms. *AgriEngineering*, 7(6), 183.
8. Jadidi, B., Wang, M., Mohanty, S., & Khinast, J. G. (2023). A comprehensive review of the application of DEM in the investigation of solid-solid mixing. *Reviews in Chemical Engineering*, 39(8), 903–945.
9. Lević, L. (2009). Evaluation of homogeneity in feed by method of Microtracers®. *Microtracers Inc., Technical Bulletin B-2*.
10. Lysenko, V. P. (2022). *Oborudovanie i tekhnologii proizvodstva kombikormov. FNTs kormov im. V. R. Vil'yamsa*.
11. Marczuk, A., Caban, J., & Tanas, W. (2019). Improving efficiency of horizontal ribbon mixer by optimizing rotational speed and mixing time. *Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*, 21(1), 134–141.

12. Ottino, J. M., & Khakhar, D. V. (2000). Mixing and segregation of granular materials. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 32, 55–91.
13. Pernenkil, L., & Cooney, C. L. (2006). A review on the continuous blending of powders. *Chemical Engineering Science*, 61(2), 720–742.
14. Wang, M., Wang, K., Wen, B., Li, J., Cen, H., Li, L., & Jing, W. (2023). Design and testing of segmented spiral total mix ration mixer. *Processes*, 11(11), 3124.
15. Yang, L., Hrenya, C. M., & Thornton, A. R. (2022). A continuum model for the segregation of bidisperse particles in granular flows. *AIChE Journal*, 68(2), e17532.
16. Tripathi, A., & Khakhar, D. V. (2021). Theory for size segregation in flowing granular mixtures based on a normal stress difference. *Physical Review E*, 103, L031301.
17. GMP+ International. (2024). S9.14 Examples of methods for measuring carry-over and homogeneity. *GMP+ International Guideline*.
18. BMEL. (2017). Guidance document on the verification of manufacturing accuracy and homogeneity of feed. Federal Ministry of Food and Agriculture.
19. Microtracer GmbH. (2018). Assuring high quality pet food production. Technical brochure.
20. Djuragic, O., Lević, J., Sredanović, S., & Lević, L. (2019). Assessing the quality of homogeneity of pet food using ferromagnetic Microtracers. *Biotechnology in Animal Husbandry*, 35(2), 173–184.
21. Лінко, М. О. (2024). Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів експандера комбікормів (Дисертація доктора філософії). Дніпровський державний аграрно-економічний університет.
22. Лисенко, В. П., та ін. (2021). *Oborudovanie i tekhnologii proizvodstva kombikormov. Metodicheskoe posobie*.

ДОДАТКИ

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

Підвищення ефективності процесу приготування комбікормів

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІ-3-24

Ренгус Володимир Володимирович

Науковий керівник: PhD, старший викладач

Білоус Ілля Михайлович

Дніпро-2025

Мета і задачі досліджень

Мета дипломної роботи - підвищення ефективності приготування комбікормів шляхом обґрунтування параметрів і режимів роботи змішувача.

Відповідно до поставленої мети визначено такі завдання дослідження:

- провести аналіз технічних засобів для змішування сипких матеріалів;
- розробити теоретичні залежності енергетичних і потужнісних показників процесу змішування з урахуванням фізико-механічних властивостей комбікормів;
- виконати експериментальні дослідження змішувача в лабораторних умовах і встановити вплив його конструктивних параметрів та режимів роботи на якість суміші й питому енергоємність процесу змішування;
- визначити економічну ефективність запропонованого технічного рішення.

Аналіз стану питання

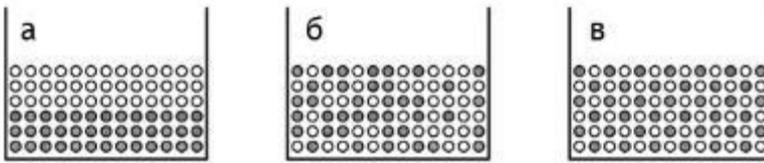


Рисунок 1 - Стадії змішування двох компонентів: а - вихідний стан; б - статистичний розподіл компонентів у процесі змішування; в - ідеально перемішана суміш (практично не здійсненна)



Рисунок 2 - Класифікація змішувачів сипких кормів

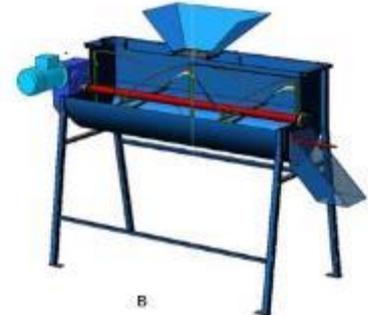
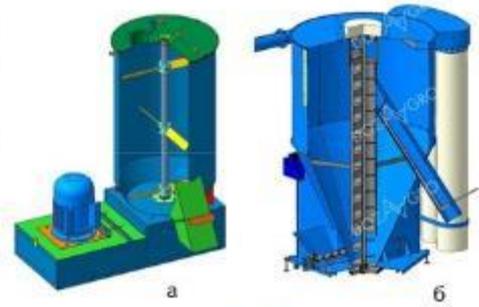


Рисунок 3 - Найпоширеніші конструкції змішувачів сипких кормів: а - вертикальний лопатевий; б - вертикальний шнековий; в - горизонтальний стрічковий

3

Аналіз стану питання

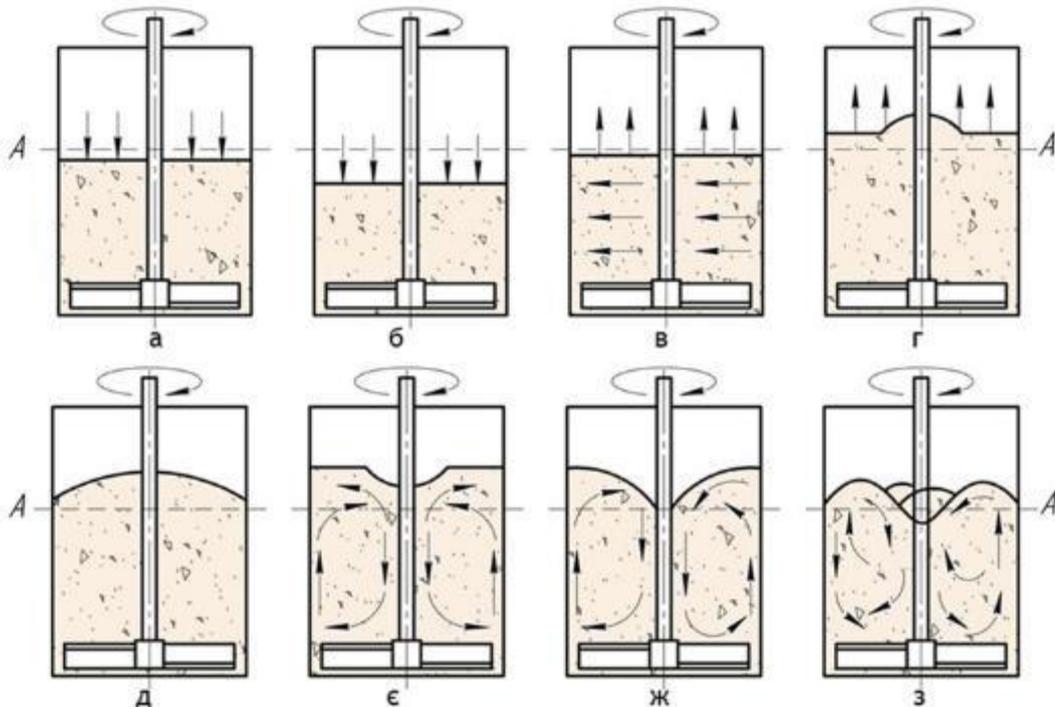


Рисунок 5 - Етапи формування псевдозрідженого стану сипкого матеріалу залежно від швидкості обертання лопатевої мішалки: А - вихідне положення вільного рівня засипання матеріалу в змішувач

4

Теоретичні дослідження

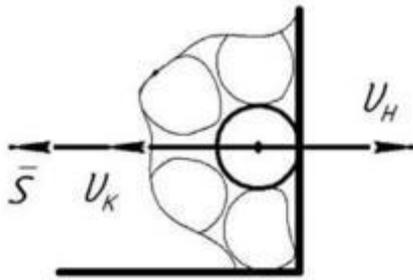


Рисунок 2.3 - Умови прямого удару

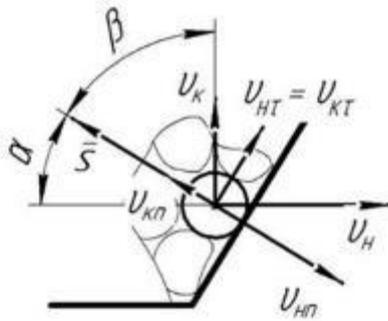


Рисунок 2.4 - Умови косого удару

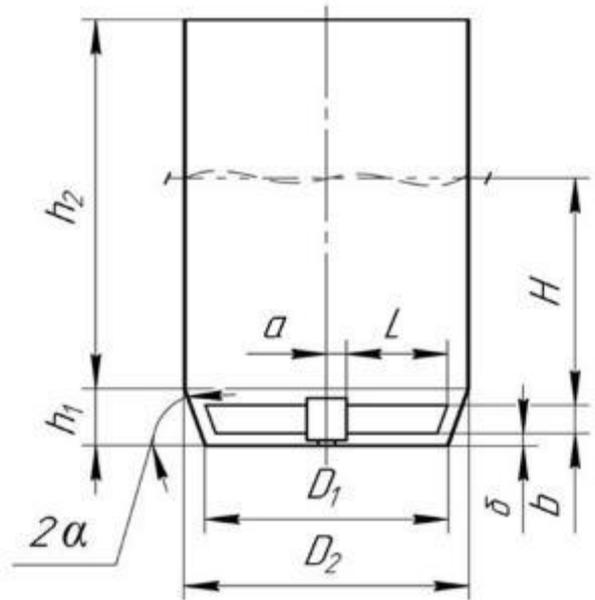


Рисунок 2.5 - Розрахункова схема змішувача

5

Теоретичні дослідження

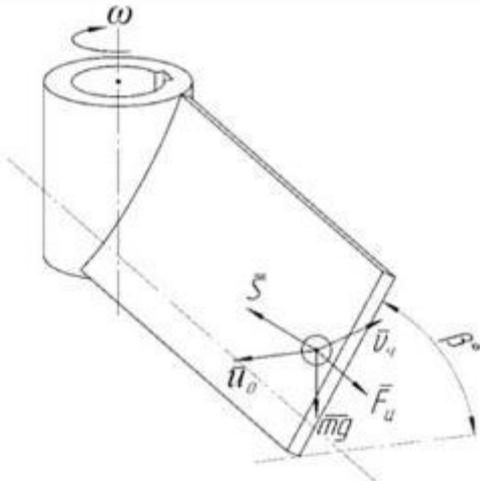


Рисунок 2.7 - Розрахункова схема дії сил і швидкостей на частинку суміші під час її сходження з лопаті мішалки

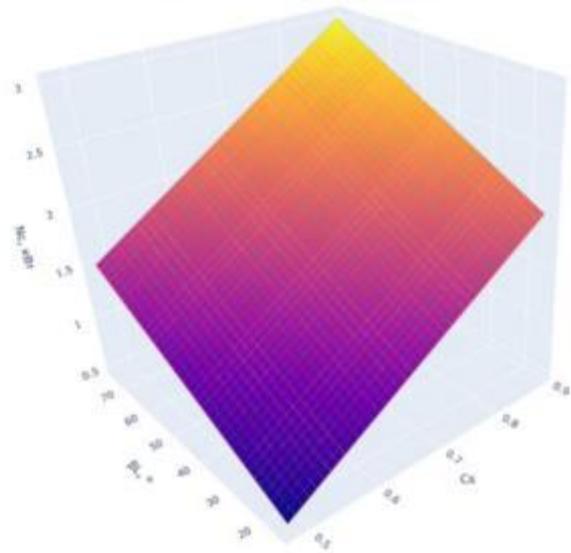


Рисунок 2.8 - Залежність потужності від структурно-механічного опору шару комбікорму та кута нахилу лопаті

Теоретична потужність, необхідної для підтримання умов псевдозрідженого змішування:

$$N_c = \left[\rho_s V_c^2 C_s \left(\frac{\pi n(L+a)\varepsilon \sin \beta_l}{30 f_0 f} \right)^2 + 2H_s \rho_s g f S_c b \sin \beta_l \right] \omega$$

6

Програма та методика експериментальних досліджень



1 - бункер; 2 - лоток для вивантаження; 3 - привід; 4 - рама; 5 - блок керування; 6 - панель керування.

Рисунок 3.2 - Експериментальна установка змішувача комбікормів



Рисунок 3.3 - Завантаження компонентів суміші та відбір проб

Фактори, що підлягають дослідженню, та рівні їх варіювання

Фактори	позначення	Рівні факторів			Інтервал варіювання
		-1	0	+1	
Колова швидкість на краю лопаті u_0 , м/с	X_1	8	9,5	11	1,5
Час змішування t , с	X_2	30	90	150	60
Кут установлення лопаті β_L , градуси	X_3	30	45	60	15

У якості функції відгуку обрано:

- питома витрата енергоємність, кВт·год/т (E_f);
- коефіцієнт неоднорідності одержуваної сухої суміші, % (V_c);

7

Результати експериментальних досліджень

Неоднорідність змішування

$$\bar{Y}_1 = 7.72077 - 9.955X_1 - 4.315X_2 - 5.155X_3 + 9.59115X_1^2 + 2.7425X_1X_2 + 6.6425X_1X_3 + 5.32115X_2^2 + 2.6675X_2X_3$$

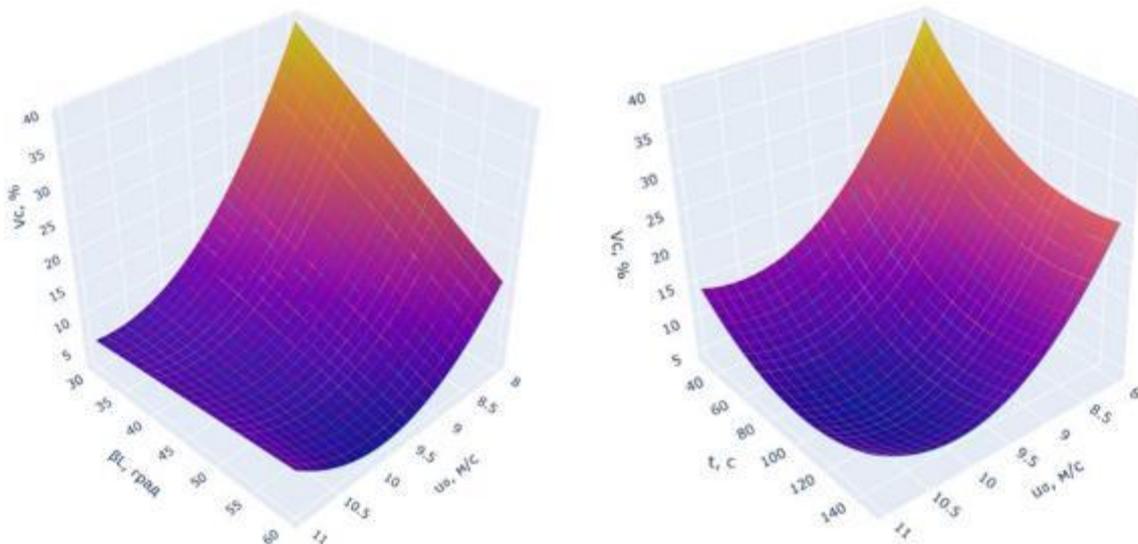


Рисунок 3.4 - Поверхні відгуку впливу окружної швидкості на краю лопаті u_0 (м/с), кута нахилу лопаті β_L (град) і часу змішування t (с) на коефіцієнт неоднорідності суміші V_c (%)

8

Результати експериментальних досліджень

Питома енергоємність

$$Y_2 = 3.04769 - 0.575X_1 + 2.105X_2 - 0.605X_3 + 0.0615385X_1^2 - 0.3825X_1X_2 + 0.1025X_1X_3 - 0.4025X_2X_3 + 0.171538X_3^2$$

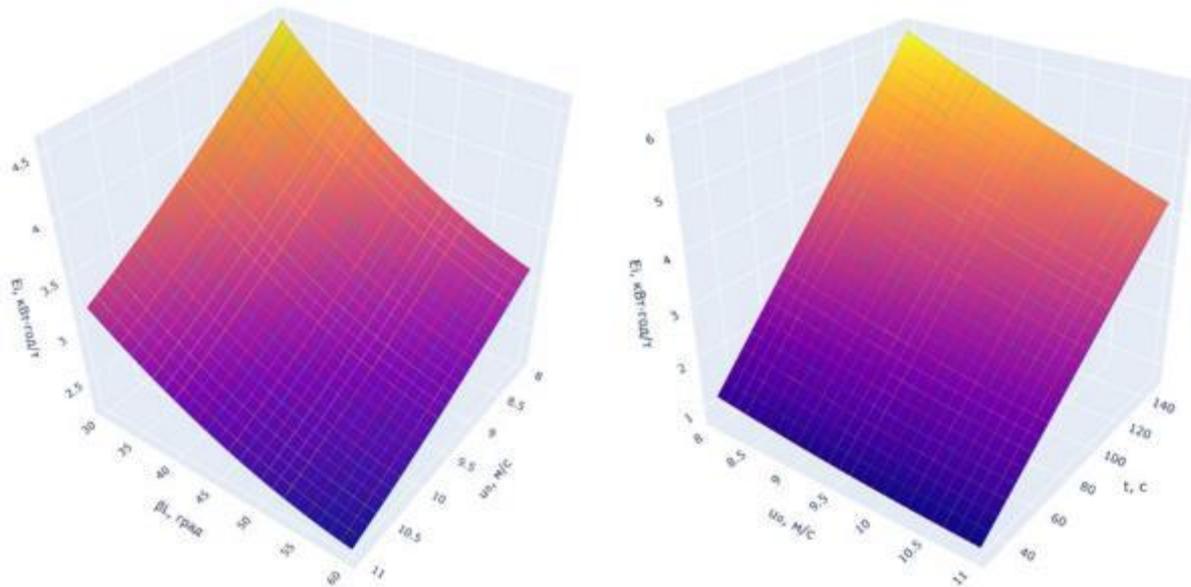


Рисунок 3.5 - Поверхні відгуку впливу окружної швидкості на краю лопаті u_0 (м/с), кута нахилу лопаті β_L (град) і часу змішування t (с) на енергоємність процесу змішування E_i (кВт·год/т)

9

Результати експериментальних досліджень

Задачу оптимізації параметрів змішувача записували у вигляді системи:

$$\begin{cases} V_c = f(X_1, X_2, X_3) \leq 10\%, \\ E_i = f(X_1, X_2, X_3) \rightarrow \min, \\ -1 \leq X_1 \leq 1, \\ -1 \leq X_2 \leq 1, \\ -1 \leq X_3 \leq 1. \end{cases}$$

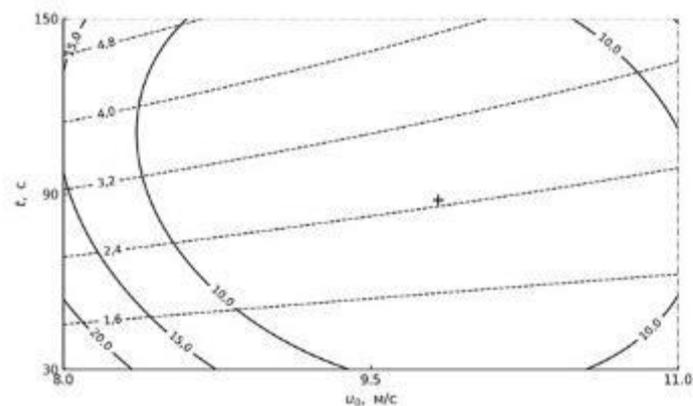


Рисунок 4.14 - Контури перерізу поверхні відгуку при розв'язанні оптимізаційної задачі

Оптимальні параметри та режими роботи змішувача, які забезпечують виконання зоотехнічних вимог щодо однорідності суміші ($V_c \leq 10\%$) при мінімальній енергоємності процесу, мають такі значення:

- колова швидкість на краю лопаті $u_0 = 9,83$ м/с;
- час змішування $t = 88$ с;
- кут установлення лопаті $\beta_L = 60^\circ$.

При цьому:

- коефіцієнт неоднорідності суміші становить $V_c = 2,51\%$;
- енергоємність змішування – $E_i = 2,31$ кВт·год/т.

10

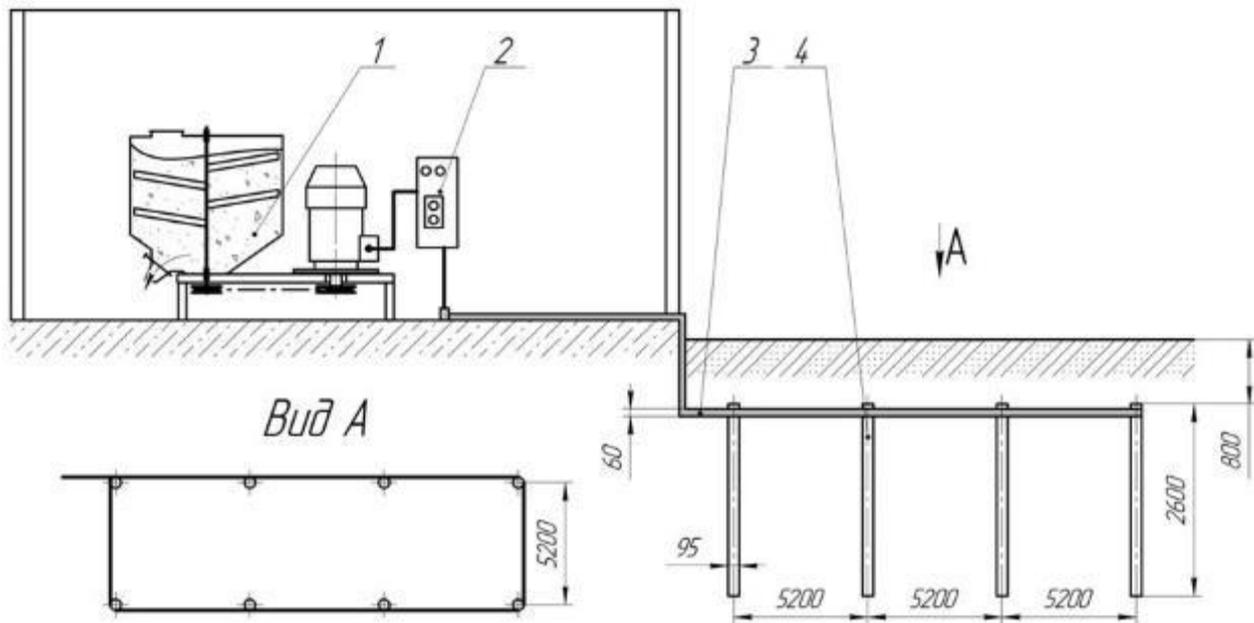


Рисунок 16 - Схема контурного захисного заземлення змішувача: 1 - змішувач; 2 - блок керування; 3 - горизонтальна смуга; 4 - вертикальний заземлювач

11

Техніко-економічна оцінка

Показники	ЗКК-12 (базовий)	Розроблений змішувач	Проектний, % до базового
Продуктивність, т/год	1,2	1,5	125,0
Встановлена потужність, кВт	2,2	1,6	72,7
Обслуговуючий персонал, люд.	1	1	100,0
Балансова вартість, грн	93 600	-	-
Капітальні вкладення, грн	-	62 500	-
Питомі річні експлуатаційні витрати, грн/т	151,34	116,97	77,29
у т.ч. заробітна платня, грн/т	133,93	107,14	80,0
витрати на електроенергію, грн/т	11,00	6,40	58,2
амортизаційні відрахування, грн/т	2,67	1,43	53,4
витрати на ТО та ремонт, грн/т	3,74	2,00	53,4
Максимальне річне навантаження, т	3504	4380	125,0
Економія питомих експлуатаційних витрат, грн/т	-	34,37	-
Економія експлуатаційних витрат, грн/рік	-	150 549,4	-
Строк окупності капітальних вкладень, років	-	0,42	-

12

1. Виконано аналіз технологій приготування комбікормів і конструкцій змішувачів. Показано, що серійні машини не забезпечують потрібної однорідності суміші за малої частки ключового компонента при прийнятній енергоємності, що обґрунтовує необхідність розроблення нового змішувача та визначає мету й завдання роботи.
2. Теоретично обґрунтовано форму змішувальної камери та параметри робочого органа з урахуванням умов псевдозрідження й характеру удару частинок об стінки бункера. Отримано розрахункові залежності для визначення потужності приводу, питомої енергоємності та зв'язку геометричних і кінематичних параметрів змішувача.
3. Розроблено методику й проведено багатофакторний експеримент за планом Бокса-Бенкіна. На основі регресійних моделей і поверхонь відгуку визначено оптимальні режими роботи змішувача ($u_0=9,83$ м/с, $t=88$ с, $\beta L=60^\circ$), за яких коефіцієнт неоднорідності становить $V_c=2,51\%$ при питомій енергоємності $E_i=2,31$ кВт·год/т.
4. Оцінено безпеку застосування змішувача в умовах комбікормоцеху, виявлено основні небезпечні й шкідливі фактори та показано, що конструкція (герметичний корпус, кожухи приводу, зручна панель керування) сприяє їх зниженню. Розроблено інструкцію з охорони праці оператора, яка забезпечує безпечну експлуатацію обладнання за умови її дотримання.
5. Проведена техніко-економічна оцінка показала, що розроблений змішувач за продуктивності 1,5 т/год і потужності 1,6 кВт знижує питомі експлуатаційні витрати з 151,34 до 116,97 грн/т і забезпечує річну економію близько 150,5 тис. грн. Строк окупності капітальних вкладень становить $\approx 0,42$ року, що підтверджує доцільність впровадження змішувача в виробничих умовах.