

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

Факультет інженерії та енергетики  
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**Олійник Михайло Олександрович**

**УДК 631.22:621.926**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ І РЕЖИМІВ  
РОБОТИ ЗМІШУВАЧА КОНЦЕНТРОВАНИХ  
КОРМІВ**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Олійник М.О.

**Керівник роботи**

Ільченко А.В.

кандидат технічних наук, доцент

**Житомир – 2025**

## АНОТАЦІЯ

**Олійник Михайло Олександрович. Обґрунтування параметрів і режимів роботи змішувача концентрованих кормів.** – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Магістерська робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі підвищення ефективності процесу змішування концентрованих кормів на тваринницьких підприємствах агропромислового комплексу шляхом удосконалення конструкції змішувального обладнання. На підставі аналізу сучасних тенденцій розвитку технічних засобів для змішування концентрованих кормів уточнено та вдосконалено класифікацію змішувачів, що дозволило обґрунтувати доцільність застосування робочого органа у вигляді шнека з намотуванням, оснащеним пересипними (циркуляційними) отворами.

Розроблено конструктивно-технологічну схему змішувача концентрованих кормів та виготовлено його експериментальний зразок. Отримано математичні моделі оцінки основних показників роботи змішувача у вигляді адекватних рівнянь регресії, що описують вплив конструктивних і режимних параметрів на продуктивність, споживану потужність та енергоємність процесу змішування. Проведено оптимізацію параметрів роботи змішувача, за результатами якої встановлено раціональні значення частоти обертання робочого органа та коефіцієнта пересипання. Достовірність теоретичних положень підтверджено експериментальними дослідженнями, результати яких узгоджуються з теоретичними залежностями у межах 95% довірчого інтервалу.

*Ключові слова:* змішувач концентрованих кормів; шнековий змішувач; робочий орган; пересипні отвори; коефіцієнт пересипання; конструктивно-технологічна схема.

## ANNOTATION

**Mykhailo Oleksandrovych Oliinyk. Justification of Parameters and Operating Modes of a Concentrated Feed Mixer.** – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering.  
– Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The master's thesis is devoted to solving a relevant scientific and technical problem of improving the efficiency of the process of mixing concentrated feeds at livestock enterprises of the agro-industrial complex by improving the design of mixing equipment. Based on an analysis of current trends in the development of technical means for mixing concentrated feeds, the classification of mixers has been refined and improved, which made it possible to substantiate the feasibility of using a working body in the form of a screw equipped with a winding provided with transfer (circulation) openings.

A structural and technological scheme of a concentrated feed mixer has been developed and an experimental prototype has been manufactured. Mathematical models for evaluating the main performance indicators of the mixer have been obtained in the form of adequate regression equations describing the influence of design and operating parameters on productivity, power consumption, and the energy intensity of the mixing process. The operating parameters of the mixer have been optimized, as a result of which rational values of the rotational speed of the working body and the transfer coefficient have been established. The reliability of the theoretical provisions has been confirmed by experimental studies, the results of which are consistent with the theoretical relationships within a 95% confidence interval.

*Keywords: concentrated feed mixer; screw mixer; working body; transfer openings; transfer coefficient; structural and technological scheme.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ КОРМІВ.....	9
РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ЗМІШУВАЧА ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	24
РОЗДІЛ 3. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	33
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	42
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	43

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Сучасний етап розвитку тваринницької галузі агропромислового комплексу характеризується зростанням вимог до якості кормів, зокрема до рівномірності розподілу поживних і біологічно активних компонентів у складі концентрованих кормів. Від якості процесу змішування значною мірою залежать продуктивність тварин, ефективність використання кормових ресурсів та стабільність технологічних процесів на тваринницьких підприємствах. За умов підвищення вартості енергоресурсів та необхідності зниження собівартості продукції особливої актуальності набуває завдання підвищення енергоефективності машин для приготування кормів.

Незважаючи на значну кількість існуючих конструкцій змішувачів концентрованих кормів, їх робота часто супроводжується підвищеною енергоємністю, нерівномірністю змішування та недостатньою адаптованістю до різноманітного фракційного складу компонентів. У багатьох випадках конструктивні параметри та режими роботи змішувального обладнання обираються без належного наукового обґрунтування, що призводить до перевитрат електроенергії, зниження продуктивності та погіршення однорідності кормових сумішей.

Особливо актуальним є вдосконалення шнекових змішувачів, які широко застосовуються на тваринницьких підприємствах завдяки простоті конструкції та надійності, проте потребують оптимізації геометрії робочих органів і режимів їх роботи. Використання робочих органів із пересипними отворами створює передумови для інтенсифікації процесу перемішування, покращення циркуляції кормової маси та зниження енергоємності процесу, однак питання вибору раціональних параметрів таких змішувачів залишається недостатньо вивченим.

У зв'язку з цим обґрунтування конструктивних параметрів і режимів роботи змішувача концентрованих кормів на основі поєднання теоретичних і експериментальних досліджень є актуальним науково-прикладним завданням,

вирішення якого сприятиме підвищенню ефективності механізації процесів кормоприготування та конкурентоспроможності тваринницьких підприємств агропромислового комплексу.

**Метою магістерської роботи** є підвищення ефективності процесу змішування концентрованих кормів шляхом удосконалення конструкції змішувача з робочим органом у вигляді шнека, оснащеного намотуванням з пересипними отворами, та обґрунтування раціональних конструктивних і режимних параметрів його роботи.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв'язати такі **основні завдання:**

- проаналізувати сучасний стан і тенденції розвитку технічних засобів для змішування концентрованих кормів, що застосовуються на тваринницьких підприємствах АПК;
- розробити конструктивно-технологічну схему змішувача концентрованих кормів з робочим органом у вигляді шнека, оснащеного пересипними отворами;
- виготовити експериментальний зразок змішувача та розробити методику експериментальних досліджень;
- оптимізувати конструктивні та режимні параметри змішувача концентрованих кормів за критеріями продуктивності та енергоємності процесу.

**Об'єкт досліджень** – технологічний процес змішування концентрованих кормів у змішувачах шнекового типу.

**Предмет досліджень** – закономірності впливу конструктивних параметрів робочого органа (шнека з намотуванням і пересипними отворами) та режимів його роботи на показники ефективності процесу змішування концентрованих кормів, зокрема продуктивність, споживану потужність і енергоємність.

**Методи наукового дослідження.** Експериментальні дослідження проводилися в лабораторних умовах і фермерських господарствах відповідно до апробованих методик і базувалися на теорії планування багатofакторного

експерименту. Обробка отриманих результатів виконувалася методом математичної статистики з використанням такого ПЗ, як Mathcad, Microsoft Excel.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. **Олійник М.**, Ільченко А. Аналіз існуючих конструкцій змішувачів кормів. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. С. 119-126.

2. Ільченко А.В., **Олійник М.О.** Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми змішувача з робочим органом у вигляді шнека. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. С. 418-420.

3. **Олійник М.О.** Експериментальний зразок змішувача концентрованих кормів із перфорованим робочим органом. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 77-79.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практичне значення магістерської роботи полягає у можливості використання отриманих результатів при проєктуванні, модернізації та експлуатації змішувачів концентрованих кормів на тваринницьких підприємствах агропромислового комплексу. Запропонована конструктивно-технологічна схема змішувача з робочим органом у вигляді шнека, оснащеного намотуванням з пересипними отворами, може бути використана при створенні нових або вдосконаленні існуючих машин для приготування концентрованих кормів з підвищеною однорідністю суміші та зниженими енерговитратами.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 22 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 45 сторінок комп'ютерного тексту, містить 21 рисунок.

## РОЗДІЛ 1

### СУЧАСНИЙ СТАН ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ КОРМІВ

#### 1.1. Стан питання підвищення ефективності процесу змішування концентрованих кормів

Змішування компонентів корму є одним з трьох базових технологічних процесів у виробництві комбікормів (разом з подрібненням та дозуванням), і основним критерієм його якості є однорідність готової суміші. Висока однорідність гарантує рівномірне надходження поживних речовин у кожную порцію корму, що надзвичайно важливо для підтримання продуктивності тварин. Галузеві норми вважають коефіцієнт варіації (CV) меншим за 10% за граничний рівень прийнятної гомогенності, хоча для найвищих вимог рекомендується досягати  $CV \leq 5\%$ . Одночасно технологічна ефективність змішування вимірюється швидкістю циклу (часом змішування), продуктивністю змішувача та питомими енерговитратами. Зниження тривалості змішування і енергоспоживання при збереженні необхідної якості суміші – ключові завдання інженерних досліджень у цій сфері. У цій статті проаналізовано технічні та конструктивні аспекти змішувачів концентрованих кормів, зокрема їх типи, режими роботи, параметри процесу змішування, однорідність суміші та енерговитрати. Наведено огляд сучасних наукових публікацій та технічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності процесу змішування [4].

Дослідження процесу змішування концентрованих кормів включає вивчення динаміки руху частинок різної природи та конструкцій змішувачів. Славкова та співавт. (2014) розглядали проблему збагачення концентратів кормів жиророзчинними вітамінами. Автори [7-9] вказували, що основними причинами погіршення якості змішування є різні агрегатні стани компонентів («тверде тіло» та рідина) і швидке поглинання рідини сипкими матеріалами, через що краплини добавок осідають на мішалці. Для цього був розроблений новий гравітаційний

змішувач із крапельним зрошенням, що збільшує площу контакту фаз. Експериментально підтверджено, що використання такого змішувача при додаванні рідких компонентів підвищує гомогенність ( $\eta \approx 97\%$ ) та значно зменшує питомі енергозатрати (з  $\sim 3,34$  до  $0,56$  кВт·год/т) в порівнянні з традиційними рішеннями. Цей приклад ілюструє важливість конструктивної оптимізації змішувача під конкретні умови (додавання вітамінних добавок) для підвищення ефективності процесу [6].

В експериментах зі змішування сухих кормів часто вимірюють час змішування та рівень однорідності за CV. Зокрема, Groesbeck та співавт. (2007) продемонстрували, що збільшення тривалості змішування призводить до зменшення дисперсії ключових компонентів суміші (наприклад, вмісту протеїну) [9].

У багатьох публікаціях підкреслюється, що час змішування є ключовим параметром: занадто короткий час призводить до нерівномірного розподілу інгредієнтів, а надто довгий — може пошкоджувати структуру матеріалів або бути економічно недоцільним. Так, Rocha та співавт. (2022) показали на прикладі корму для курей, що CV зменшується при подовженні часу змішування (див. таблицю 1 з даними CV при 30–120 с у [4]), що корелює зі зростанням продуктивності молодняку за Groesbeck (2007). На рівні норм та стандартів також відзначено необхідність регулярного контролю однорідності готової суміші, з метою досягнення CV в межах 5–10%.

Останні дослідження приділяють увагу і аналізу конструкцій самих змішувачів. Зокрема, узагальнені характеристики двох найбільш розповсюджених типів: горизонтальних і вертикальних змішувачів. Афум-Баонсу та співавт. (2021) провели статистичний аналіз локальних і імпортованих змішувачів для птахівництва, порівнявши їх параметри. З'ясовано, що горизонтальні (стрічкові) змішувачі характеризуються відносно короткими циклами (1,5–10 хв при 40–80 об/хв), питомою потужністю 0,9–3,8 кВт·год на цикл і забезпечують гарну однорідність ( $CV \approx 7,2\%$ ). Вертикальні (гвинтові)

змішувачі зазвичай потребують довшого часу (15–30 хв при 250–500 об/хв) і іноді мають вищі енергозатрати (0,8–5,5 кВт·год/цикл), проте вони демонструють нижчі вимоги до обслуговування [7]. Важливим є критерій: значення  $CV < 10\%$  часто розглядається індустрією як мінімальний показник «достатньої» однорідності [5].

Типи змішувачів і їх режими. За конструкцією змішувачі концентрованих кормів можна умовно поділити на горизонтальні, вертикальні та похилі. Горизонтальні змішувачі зазвичай виконані у вигляді циліндричного барабану з двома гвинтовими стрічками (або лопатями), що створюють двонаправлений потік матеріалу. Відмінності між підтипами: стрічкові (double ribbon) та лопастеві (paddle) змішувачі. Так, лопастеві змішувачі ідеальні для компонентів з високою щільністю чи в'язкістю, оскільки створюють агресивне струменеве перемішування [5]. Менш щільні або пористі матеріали частіше змішують у стрічкових машинах. Згідно з галузевими даними, змішувачі з лопатями мають типові часи 1,5–2,5 хв і можуть працювати при мінімальному завантаженні 20–40%, тоді як найпоширеніші гвинтові (стрічкові) змішувачі потребують 3,5–4 хв і при низькому заповненні ( $\leq 75\text{--}80\%$ ) площа гвинта повинна бути повністю заповнена [4]. Новітні конструкції «з подвійною турбулентністю» на лопатевих мішалках призначені для поліпшення введення рідинних добавок і кращої гомогенізації малих доз адитивів [12].

Вертикальні змішувачі (з гвинтовим мішалкою, одновісьові або багатівісьові) застосовують насамперед для великих партій або на фермерських установках. Їхній мішалковий пристрій забезпечує високі швидкості обертання (до 250–500 об/хв) при інтенсивній турбулізації. Завдяки конструкції зі змінним перерізом мішалкового каналу (конусне розширення), вертикальні змішувачі забезпечують тотальну циркуляцію суміші: вже після 4–5 обертів змінна частина корму проходить через весь простір корпусу (класичний «kettle flow»), що вважається достатнім для досягнення майже ідеальної однорідності [4].

Враховуючи параметри режиму, горизонтальні змішувачі зазвичай працюють з більшою потужністю та коротшими циклами. Наприклад, Афум-Баонсу (2021) показав, що середній час змішування для стрічкових міксерів становить 1,5–10 хв при швидкостях 40–80 об/хв [7]. Питомий об'єм завантаження цих машин може бути великим – сотні кілограмів на партію, досягнуто швидкість переробки до 427 кг/год в експериментальному міксері [2]. Вертикальні ж змішувачі вимагають більше часу (15–30 хв) при 250–500 об/хв, тому їхня продуктивність в кг/год часто менша. Наприклад, Горизонтальний міксер промислової лінії міг обробляти десятки тонн на годину, тоді як типова потужність фермерського вертикального комплексу – лише кілька тон/год.

Рівень однорідності зміші. Для оцінки гомогенності суміші найчастіше застосовують метод мікросамплінгу і розрахунок коефіцієнта варіації (CV). Нижча CV свідчить про кращу однорідність. Як уже зазначено, критичним вважається  $CV \leq 10\%$  [6]. На практиці проте рекомендовані цілі жорсткіші: у наукових рекомендаціях оптимальна CV вважається менше 5%, більше 15% — незадовільно [13]. Експерименти показують, що забезпечити  $CV \approx 5-10\%$  можна при правильно підібраних режимах: наприклад, у горизонтальному міксері після 12 хв змішування було досягнуто  $CV < 10\%$  (показник «Feed variability coefficient») [14]. Аналіз італійських стандартів демонструє, що порядок додавання компонентів також впливає на якість: макрокомпоненти (зерно, макуха) слід завантажувати першими, а дрібні мікродобавки вносити останніми, щоб забезпечити рівномірний розподіл навіть найменших складників [15].

Енергетичні витрати. Питомі енергозатрати змішування (кВт·год на тонну продукції) залежать від конструкції міксера, швидкості обертання, кількості партії та співвідношення компонентів. У загальному вигляді горизонтальні міксери споживають до кількох кВт·год на цикл: Афум-Баонсу (2021) повідомив, що стрічкові міксери витрачають 0,9–3,8 кВт·год на один цикл змішування [11], тоді як вертикальні – 0,8–5,5 кВт·год [13]. Важливо, що високі обороти у вертикальних міксерів зазвичай збільшують енергоспоживання до верхніх меж.

Однак ці значення стосуються повного наповнення: реальна питома енерговитрата (кВт·год/т) може суттєво зменшуватися при оптимізації режиму. Наприклад, дослідження показало, що зменшення маси партії та скорочення часу змішування може знизити питомі витрати: при базовій масі 620 кг і 4 хв змішування однорідність досягає  $V_c=86,1\%$ , а енерговитрати зменшуються до  $\sim 1,6$  кВт·год/т [14]. Тобто конкретні цифри залежать від конструкції та режиму.

Сучасні технічні рішення націлені на підвищення однорідності при зниженні енерговитрат. Одним із підходів є вдосконалення конструкції мішалок. Так, розроблено гравітаційний змішувач зі спадаючим шаром і крапельним зрошенням (для додавання рідких добавок), який забезпечує інтенсивнішу міжфазову взаємодію і зменшує «мертві зони». Експерименти з таким обладнанням показали шестикратне зменшення питомих витрат енергії (з 3,34 до 0,56 кВт·год/т) при збереженні високої однорідності  $\eta \approx 97\%$  [16]. Це досягається завдяки тому, що новий змішувач уникає поглинання рідини на поверхнях обладнання і забезпечує рівномірне зрошення всього об'єму матеріалу.

Для сухої продукції ключовим є коректний підбір режимних параметрів. Томпоровські та співавт. (2020) виконали факторний експеримент з вертикальним стрічковим змішувачем і визначили, що менші партії та оптимальний час змішування дозволяють підвищити однорідність без зайвого збільшення потужності. Їхня модель показала: при зменшенні ваги базової суміші з 900 до 650 кг і часу змішування з 8 до 4 хв однорідність підвищується з 62% до 86,1%, а питомі енерговитрати зменшуються з 1,9 до 1,6 кВт·год/т [18]. Отже, у межах одного типу змішувача можна знаходити баланс між кількістю матеріалу і режимом для оптимізації енергопродуктивності. Також важливо враховувати питому вагу дрібних компонентів («еталонної добавки»): збільшення її відносної маси (від 50 до 150 кг на 600 кг базової суміші при 4 хв) незначно зменшило питомі витрати (з 1,64 до 1,58 кВт·год/т), при цьому однорідність залишалася високою [14].

Іншим напрямом є зміна механіки процесу. Наприклад, використання інтенсивних зрізуючих елементів (high-shear blades) чи додаткових розпушувачів покращує розпушення і змелювання грудочок в суміші. Нові конструкції з двома парами лопатей або гвинтових валами різної геометрії (двошнекові змішувачі) дозволяють досягнути більш однорідної циркуляції з мінімальною «мертвою зоною». Так, деякі фірмові рішення (Trioliet, Veritec) застосовують асиметричні клини між шнеками для запобігання заклинюванню і покращення розподілу [3]. Крім того, досліджуються технології регульованого реверсу руху, чергування швидкостей і пульсуючого змішування для зменшення енергоспоживання. Наприклад, експериментальні дані свідчать: якщо чергувати роботу міксеру (пульсуючий режим), можна знизити питомі витрати на ~20% при незначному збільшенні часу змішування. Такий підхід особливо перспективний для електричних змішувачів малої потужності, де економія енергії критична.

Значення має й послідовність подачі компонентів. Як вже згадано, введення макро- і мікрокомпонентів окремо впливає на однорідність. Новітні системи автоматичного дозування дозволяють точно дозувати добавки і мінімізувати накопичення залишків в устаткуванні. Багато досліджень також розглядають контрольовані системи очищення змішувача (періодичне змивання залишків паром або водою) для запобігання крос-контамінації та покращення повторюваної ефективності змішування [7]. Усе це технічні заходи для підтримки проектних показників машини протягом тривалого часу.

Проведений аналіз показує, що підвищити ефективність змішування концентрованих кормів можна як удосконаленням конструкції змішувачів, так і оптимізацією режимних параметрів. Горизонтальні змішувачі (стрічкові і лопастеві) забезпечують коротші цикли змішування і хорошу однорідність ( $CV \approx 7-10\%$ ), проте споживають значну електроенергію. Вертикальні гвинтові змішувачі потребують більше часу та електроенергії при великих обертах, але мають простіший механізм і зручніше очищуються. Значущим є вплив співвідношення завантаження, часу та швидкості: згідно з експериментальними

даними, оптимізація цих параметрів дозволяє одночасно покращити однорідність суміші та знизити питомі енерговитрати. Ідеальні змішувачі досягають  $CV < 5-10\%$  при невеликих  $CV$  відхиленнях і питомих енерговитратах на рівні  $\sim 1-2$  кВт·год/т, проте на практиці необхідно враховувати компроміс із продуктивністю.

Конструктивні інновації дають додатковий прибуток: наприклад, гравітаційні розпилювальні змішувачі показали зниження енергетичних витрат у 6 разів при збереженні високої гомогенності. Аналогічно, інтеграція додаткових турбулізаторів, періодичний реверс або пульсація приводять до зниження споживання на 15–20%. Незважаючи на велике число сучасних розробок, проблема повного теоретичного опису процесу змішування залишається складною (через нелінійність руху великої кількості частинок і множинність впливових чинників).

Висновки, що напрашуються: при проектуванні змішувального обладнання слід прагнути до забезпечення необхідної однорідності суміші ( $CV \leq 10\%$ ) при мінімізації часу циклу та енергоспоживання. Це вимагає комплексного підходу – від моделювання динаміки частинок до практичних випробувань. Подальші дослідження повинні детальніше розглянути наприклад безперервні процеси змішування, нові гібридні конструкції (вакуумні, високошвидкісні змішувачі) та автоматизовані системи керування режимом. Отримані знання і технічні рішення дозволять знизити втрати енергії й підвищити стабільність технологічного процесу при виробництві концентрованих комбікормів, що є важливим завданням для кормової промисловості.

## **1.2 Аналіз існуючих конструкцій змішувачів кормів**

Класифікація змішувачів для кормів базується на ряді функціональних і конструктивних ознак, що дає змогу обрати оптимальний варіант для конкретних завдань і умов експлуатації [1]:

- за конструкцією робочого елемента;
- за конфігурацією розташування корпусу;
- за тривалістю та режимом роботи;
- за характеристиками оброблюваних інгредієнтів;
- за функціональною специфікою;
- за типом змішувального механізму.

Вертикальні змішувачі зазвичай являють собою циліндр із конусоподібним дном знизу та воронкою для завантаження зверху. Унизу розташований вертикальний шнек. Сировина потрапляє в нижню воронку, шнек піднімає її вгору, після чого маса спадає вниз по стінках. Таким чином процес відбувається безперервно, а цикл змішування зазвичай триває всього кілька хвилин [1].

Характерним недоліком є невисока однорідність корму під час додавання рідких інгредієнтів.

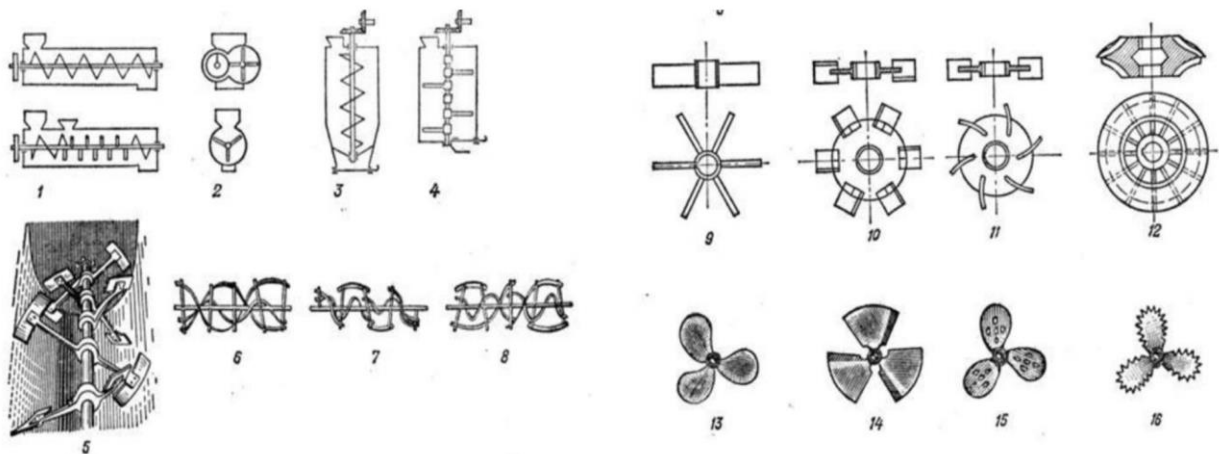


Рис. 1.1. Схематичні зображення основних типів мішалок: 1–3 – змішувачі шнекового типу; 4–5 – лопатеві змішувачі; 6–8 – стрічкові змішувачі; 9–12 – турбінні змішувачі; 13–16 – пропелерні змішувачі [1].

Горизонтальний змішувач зазвичай придатний як для сухих, так і для вологих матеріалів. Одним із прикладів конструкції є мішалка з лопатями, розташованими на центральному валу, а в нижній частині – вивантажувальний шнек, який подає готову суміш до вивантажувального отвору (рис. 1.2). Існують також конструкції з двома валами, що обертаються назустріч один одному, що забезпечує швидше перемішування матеріалу (рис. 1.3) [1].

Діагональний змішувач найбільш ефективно працює під час змішування порошкоподібної маси та дрібнозернистих кормів, а також добре зарекомендував себе при додаванні рідких інгредієнтів – патоки, жиру, олії тощо. Планетарний шнековий змішувач безперервної дії, зображений на рисунку 6, призначений для обробки сухих зернистих матеріалів [1].

Принцип його роботи ґрунтується на особливому розташуванні вала шнекової мішалки, який установлений з ексцентриситетом відносно вертикальної осі корпусу конічної форми. Рух мішалки має складну траєкторію: вона обертається навколо власної осі (це так зване відносне обертання), а водночас здійснює планетарний рух навколо осі корпусу – тобто переносне обертання [1].

Також існують змішувачі, у яких привід шнека здійснюється від двигуна, встановленого на верхній кришці. У цьому випадку зростає навантаження на привід обертання шнека, що ускладнює конструкцію [1].

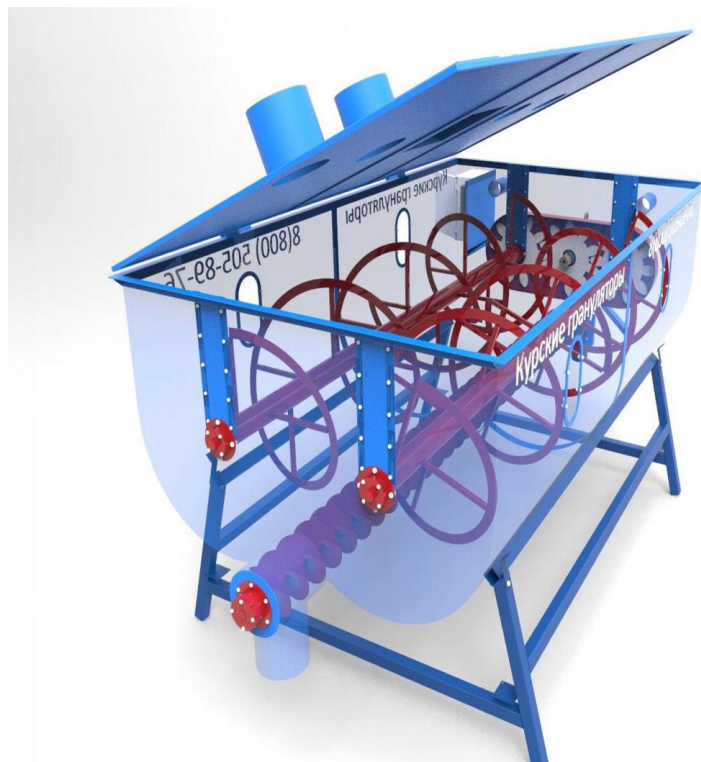


Рис. 1.2. Зовнішній вигляд горизонтального змішувача.

У патенті розглянуто процес приготування кормосуміші з використанням бункерного змішувача кормів, у якому робочий орган обертається по колу, здійснюючи перемішування поблизу стінок бункера [1].

Змішувачі цього типу відрізняються високою металоємністю, значною масою та габаритами. Недоліком конструкції є періодичний характер її роботи.

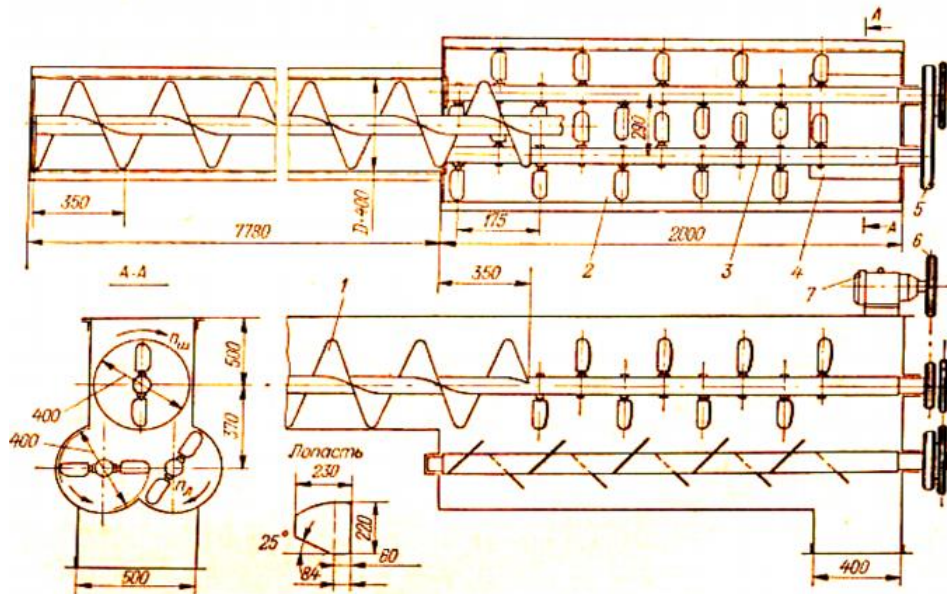


Рис. 1.3. Схема експериментального змішувача вологих кормів: 1 – горизонтальний шнек; 2 – двовальний лопатевий робочий орган; 3 – вал лопатевий; 4 – вивантажувальне вікно; 5 – шестерні; 6 – змінний зубчастий вінець; 7 – електродвигун [1].

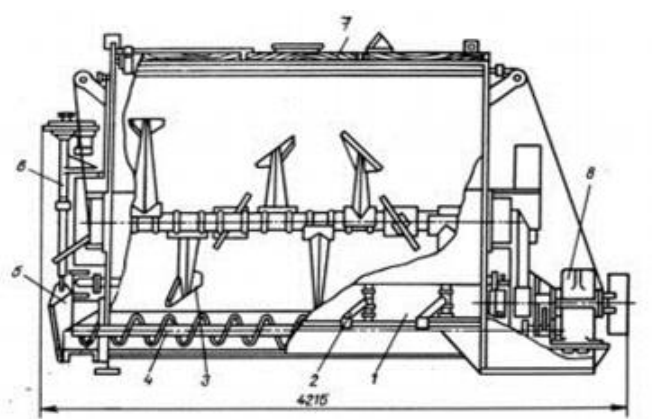


Рис. 1.4. Схема змішувача С-12: 1 – корпус; 2 – паророзподільник; 3 – лопатевий змішувач; 4 – вивантажувальний шнек; 5 – вивантажувальний патрубок із клиновою засувкою; 6 – система керування; 7 – кришка; 8 – привід [1].

Ще однією з поширених конструкцій змішувачів кормів є горизонтальні змішувачі типу СК-3.0 (рисунок 1.6). Компоненти для приготування кормів завантажують у змішувальну камеру 2. Після ввімкнення електропривода 7 починає обертатися вал із стрічковою навивкою 4, який здійснює перемішування компонентів кормосуміші. Після завершення процесу перемішування корм вивантажують через вивантажувальне вікно 6 [1].

Згідно з проведеними дослідженнями цього змішувача, оптимальна рівномірність змішування досягається лише за певного коефіцієнта заповнення змішувача. У разі значних відхилень від оптимального значення з'являється нерівномірність змішування [1].

Однією із сучасних моделей є змішувач кормів типу СГО. Його особливістю є U-подібна форма корпусу, у якому безпосередньо відбувається процес змішування. Такі модифікації змішувачів є більш доцільними для приготування концентрованих кормів для всіх видів сільськогосподарської птиці, риби, кроликів та інших видів тварин [1].

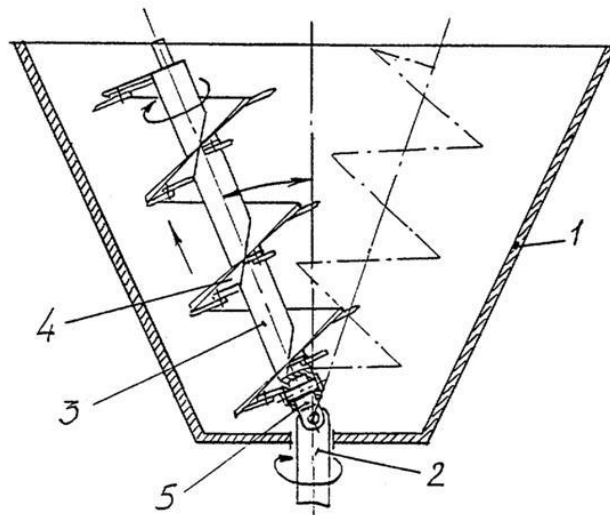


Рис. 1.5. Схема планетарного шнекового змішувача сухих кормів [1].

До конструкції змішувального механізму входить кілька ключових елементів. Основний вал оснащений спицями, розташованими під прямим кутом одна до одної, що підвищує ефективність процесу змішування. Крім того, механізм містить два спіральні контури, які спрямовують продукт у протилежні боки, забезпечуючи рівномірність змішування. Для запобігання утворенню

«мертвих зон», де перемішування могло б ускладнюватися, застосовуються спеціальні чистики, які також дають змогу повністю вивантажувати вміст змішувача без залишків [1].

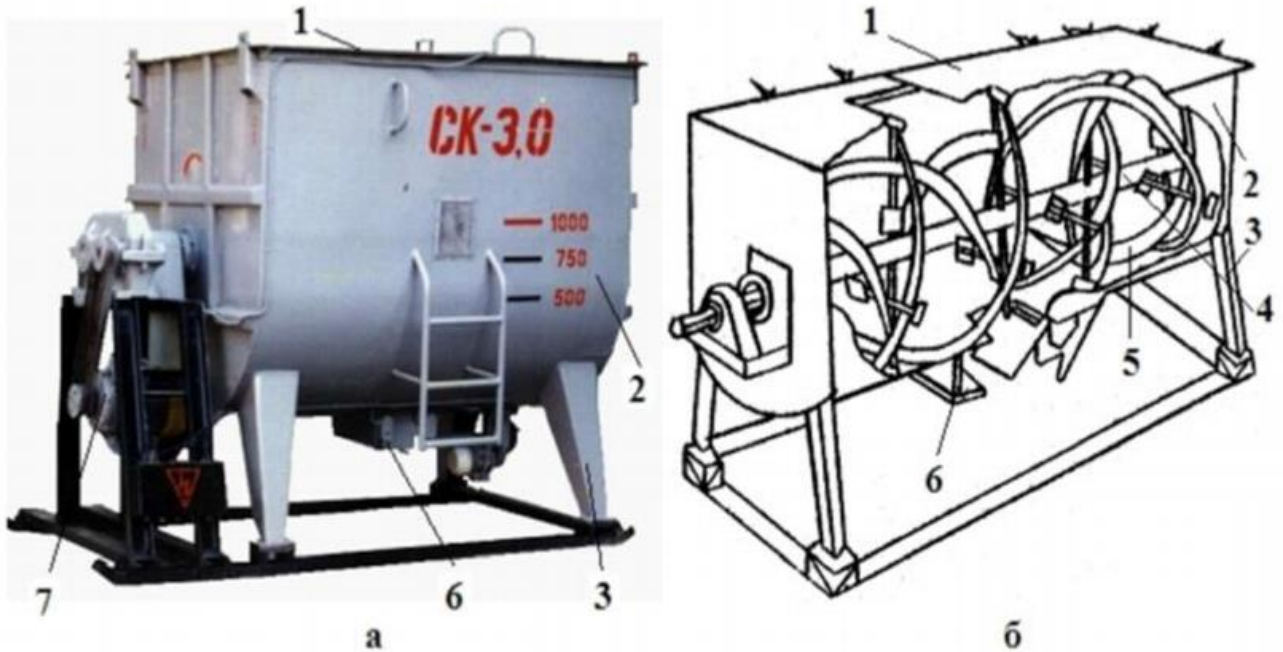


Рис. 1.6. Загальний вигляд і схема горизонтального змішувача кормів СК-3.0: 1 – кришка; 2 – корпус зі змішувальною камерою; 3 – рама; 4 – вал із стрічковою навивкою (шнек); 5 – лопаті вала; 6 – вивантажувальне вікно; 7 – електропривід [1].

З огляду на зручність експлуатації, кришка змішувача обладнана завантажувальним лотком із шиберною заслінкою, що значно спрощує процес подачі та вивантаження матеріалу. Вивантажувальний патрубок розміщено зі зміщенням відносно центральної осі апарата, завдяки чому під ним зручно встановлювати ємність для збору готової суміші або транспортер для подальшого переміщення продукту [1].

Горизонтальний змішувач типу СГО має спеціальні штуцери, через які рідкі компоненти можуть подаватися безпосередньо під час процесу змішування. Така конструкція забезпечує ефективну роботу з вологими кормосумішами, сприяючи рівномірному розподілу всіх інгредієнтів у готовому продукті [1].

Призначений для змішування багатокомпонентних комбікормів із високим ступенем однорідності та приготування білково-вітамінно-мінеральних добавок (БВМД) на основі білкової сировини й преміксів із мінімальними витратами [1].

Горизонтальні лопатеві міксери типу СВГ застосовуються для приготування білково-вітамінно-мінеральних кормів (БВМК) із білкових основ і преміксів з мінімальними витратами в умовах фермерського господарства. Ці пристрої призначені для створення однорідних сумішей із сухих, сипучих, вологих та рідких компонентів корму. У процесі змішування суміш не розділяється на окремі фракції, а її складові не піддаються додатковому нагріванню чи подрібненню. Допускається введення рідких інгредієнтів у кількості до 15% від загального об'єму суміші. Конструкція робочих елементів забезпечує повне самостійне вивантаження міксера. Підшипники винесені назовні, завдяки чому суміш захищена від потрапляння підшипникового мастила, а самі підшипники – від контакту з продуктом. Вузли з підшипниками оснащені сальниками, які запобігають проникненню пилу [1].

Аналіз використання кормозмішувачів різних типів у тваринництві виявляє низку проблем, що перешкоджають широкому впровадженню цієї технології в галузі. Розглянемо основні з них із використанням наукової та технічної термінології [1].

1. Недостатній комплексний підхід до інтеграції сучасних технологічних рішень у молочному тваринництві. Проблема полягає у відсутності системного впровадження інновацій, що призводить до неефективного використання потенціалу нових технологій. Це включає недостатню увагу до адаптації інноваційних кормозмішувачів до специфічних умов господарств, що знижує їх загальну продуктивність і позитивний вплив на показники продуктивності тварин [1].

2. Людський фактор і проблеми експлуатації техніки. Ця проблема охоплює питання кваліфікації обслуговувального персоналу, дотримання правил експлуатації та збереження обладнання. Недостатня підготовка працівників до

роботи з новими технологічними пристроями може призвести до зниження ефективності їх використання, збільшення простоїв обладнання та передчасного зношування його складових [1].

3. Недостатність фінансових ресурсів для обслуговування та оновлення техніки. Багато сільськогосподарських підприємств стикаються з обмеженими бюджетами, що ускладнює проведення регулярного технічного обслуговування та модернізації обладнання. Це призводить до підвищеного зношування техніки, зниження ефективності процесу кормовиробництва та можливих збоїв у годівлі тварин [1].

4. Застарілі конструкції ферм як обмежувальний чинник для впровадження нових технологій. Фізична інфраструктура багатьох старих ферм не відповідає сучасним вимогам для розміщення та ефективного використання новітніх технологічних рішень, зокрема кормозмішувачів. Це може включати недостатні розміри приміщень, несумісність архітектурних споруд із новими технологічними лініями, а також потребу у значних капіталовкладеннях для модернізації об'єктів, що ускладнює процес оптимізації методів утримання великої рогатої худоби та виробництва кормів [1].

### **Висновки по розділу**

Таким чином, розвиток змішувачів удосконалюється шляхом розроблення нових технічних і конструктивних рішень, заснованих на підвищенні ефективності техніко-економічних показників і параметрів обладнання для змішування. Важливу роль відіграє інтенсивність процесу змішування за допомогою лопатей та інших елементів, що сприяють досягненню більшої однорідності отримуваних концентрованих кормів.

Усе вищесказане дає підстави зробити висновок про низьку ефективність використання цього технологічного обладнання в умовах виробництва продукції тваринництва.

Наведені вище змішувачі характеризуються значним споживанням потужності, недостатньою однорідністю отримуваної кормової суміші та низькою експлуатаційною надійністю.

РОЗ

## РОЗДІЛ 2

### ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ЗМІШУВАЧА ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

#### **2.1. Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми змішувача з робочим органом у вигляді шнека, оснащеного навивкою з пересипними отворами.**

Підбір ефективного технологічного обладнання для змішування концентрованих кормів є складним завданням [1]. Це зумовлено тим, що такі корми складаються з багатьох різних компонентів, кожен із яких має свої унікальні властивості та вимоги до обробки [1, 2, 3]. Крім того, існують суворі стандарти якості, яким ці корми повинні відповідати для забезпечення здоров'я та продуктивності тварин. Тому під час вибору обладнання необхідно враховувати велику кількість факторів, таких як зносостійкість, енергоефективність і здатність до рівномірного змішування інгредієнтів [2].

У зв'язку з цим розроблення та вдосконалення технологічних рішень у цій галузі потребують комплексного та інноваційного підходу [2].

З урахуванням переваг і недоліків відомих змішувачів було розроблено шнековий змішувач концентрованих кормів [2].

Змішувач кормів (рис. 2.1) включає корпус 1, завантажувальний бункер 2 та вивантажувальне вікно 3. У внутрішній порожнині корпусу, виконаного у вигляді труби, встановлено вал 4. На одному кінці вала 4 розміщено мішалку, виконану у вигляді шнека з перфорованою навивкою 5, а на іншому кінці — шнек 6 із гвинтовою навивкою [2].

Корпус 1 поділено на приймальну камеру 7 та робочу камеру 8 відповідно. Розташовані на валу 4 мішалка та шнек 6 з'єднані між собою за допомогою шплінтового з'єднання 9 [2].

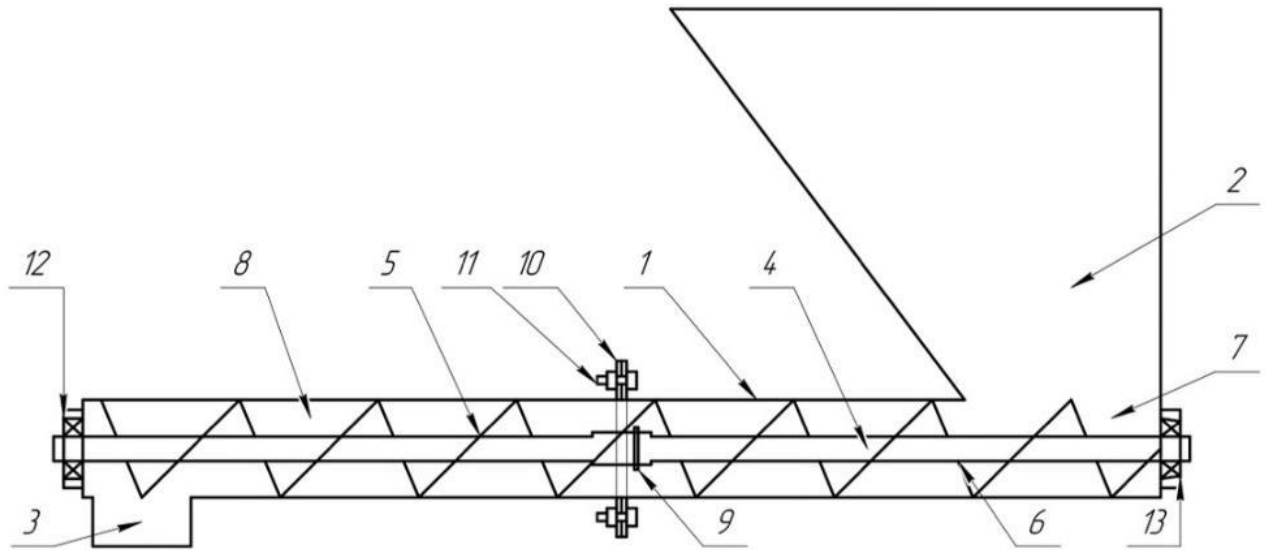


Рис. 2.1. Схематичне креслення змішувача кормів з робочим органом у вигляді шнека, оснащеного навивкою з циркуляційними отворами [2].

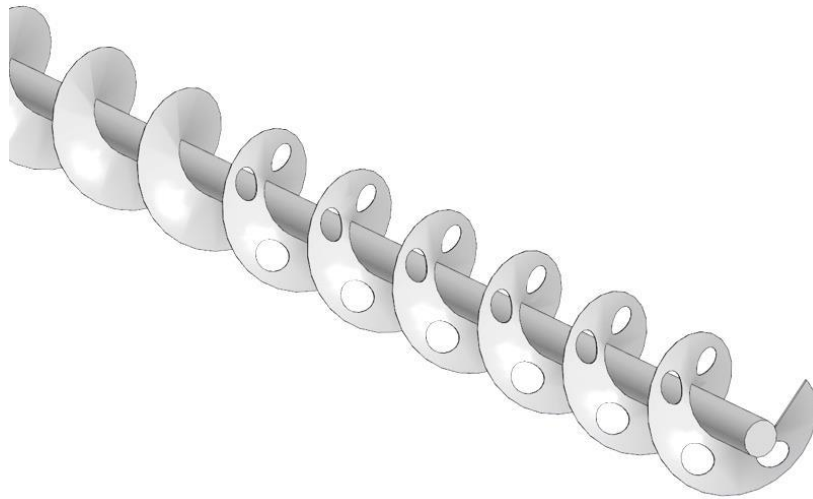


Рис. 2.2. Тривимірна модель робочого органа змішувача концентрованих кормів [2].

Шнек 6 розташований у приймальній камері 7 під завантажувальним бункером 2, а мішалка — у робочій камері 8. Робоча камера 8 і приймальна камера 7 у місці з'єднання шнека 6 з мішалкою на торцях мають фланці 10 для забезпечення болтового з'єднання 11 цих частин корпусу. Вал 4 спирається з боку вивантажувального вікна на радіальний підшипник 12, а з боку бункера — на конічний підшипник 13 [2].

Така конструкція змішувача забезпечує можливість заміни мішалки з іншими параметрами залежно від виду кормів [2].

Робота змішувача кормів відбувається таким чином:

Корм надходить у завантажувальний бункер 2, звідки потрапляє до приймальної камери 7, у якій розташований шнек 6. Під час його обертання здійснюється первинне перемішування та дозування кормів [2].

Далі корми надходять у робочу камеру 8, де завдяки пересипанню через перфоровану навивку мішалки 5 створюється турбулентний потік, який забезпечує інтенсивне перемішування кормів і вивантаження готової суміші через вивантажувальне вікно 3 [2].

Запропонована конструкція, порівняно з прототипом та іншими відомими технічними рішеннями, має такі переваги [2].:

- зниження енергоємності процесу;
- підвищення якості змішування кормів завдяки створенню турбулентного руху потоку корму в мішалці.

Запропонована конструкція, у порівнянні з іншими відомими технічними рішеннями, характеризується такими основними перевагами:

- зменшення енергоємності процесу;
- покращення рівномірності змішування кормів;
- створення турбулентного потоку кормової маси в зоні мішалки, що інтенсифікує процес [2].

Ключові особливості конструкції запропонованого змішувача [2]:

Роздільне виконання мішалки та шнека і їх з'єднання за допомогою гвинтового з'єднання, а також розподіл корпусу на приймальну та робочу камери забезпечує можливість заміни мішалки для змішування кормів різної фракції.

Перфорація витків шнека зменшує металомісткість процесу змішування та сприяє інтенсифікації перемішування, що підвищує однорідність готової суміші.

Основні фактори, що впливають на якість змішування інгредієнтів:

- фізико-механічні властивості інгредієнтів: розміри частинок, вологість, коефіцієнти зовнішнього та внутрішнього тертя, співвідношення часток компонентів, насипна густина;
- кінематичні параметри: частота обертання шнека;
- конструктивні параметри: радіус шнека, радіус вала, радіус отворів, радіус кола центрів отворів, крок витка шнека, коефіцієнт заповнення каналу, кут атаки витка шнека [2].

## **2.2. Експериментальний зразок змішувача концентрованих кормів із перфорованим робочим органом**

Для проведення експериментальних досліджень було виготовлено зразок змішувача концентрованих кормів із перфорованим робочим органом. На рис. 2.3 представлено загальний вигляд змішувача концентрованих кормів. Змішувач виконаний за моноблочною схемою, проте його конструкція передбачає легке розбирання, просту заміну мішалки, а також додавання додаткових секцій змішувача, що може дозволити працювати з кормами, які мають інші фізико-механічні властивості. Мішалка у вигляді шнека з перфорованою навивкою, яка встановлюється у робочу камеру змішувача, показана на рис. 2.4 [3].

Для проведення експерименту необхідно було забезпечити частоту обертання вала змішувача 100, 120 і 140 об/хв за умови, що частота обертання вала електродвигуна становила 1500 об/хв. Тому потрібно було використати редуктор. Передаточне число повинно було змінюватися в межах від 15 до 10,7. Таке передаточне відношення може забезпечити лише черв'ячний редуктор або інший багатоступінчастий редуктор. Було спроектовано і виготовлено триступеневий пасовий редуктор на компонентах для автомобілів. Зміна передаточного числа реалізовувалася шляхом заміни веденого шківів, встановленого на валу змішувача. Загальний вигляд бункера для завантаження компонентів концентрованого корму подано на рис. 2.6. На рис. 2.5 показано

триступеневий пасовий редуктор з установленим електродвигуном, який приводить у дію вал змішувача. Загальна конструкція бункера для завантаження компонентів концентрованого корму наведена на рис. 2.3 [3].



Рис. 2.3. Загальний вигляд експериментальної установки [3].



Рис. 2.4. Загальний вигляд шнекової мішалки з пересипними отворами [3].



Рис. 2.5. Загальний вигляд привода змішувача [3].

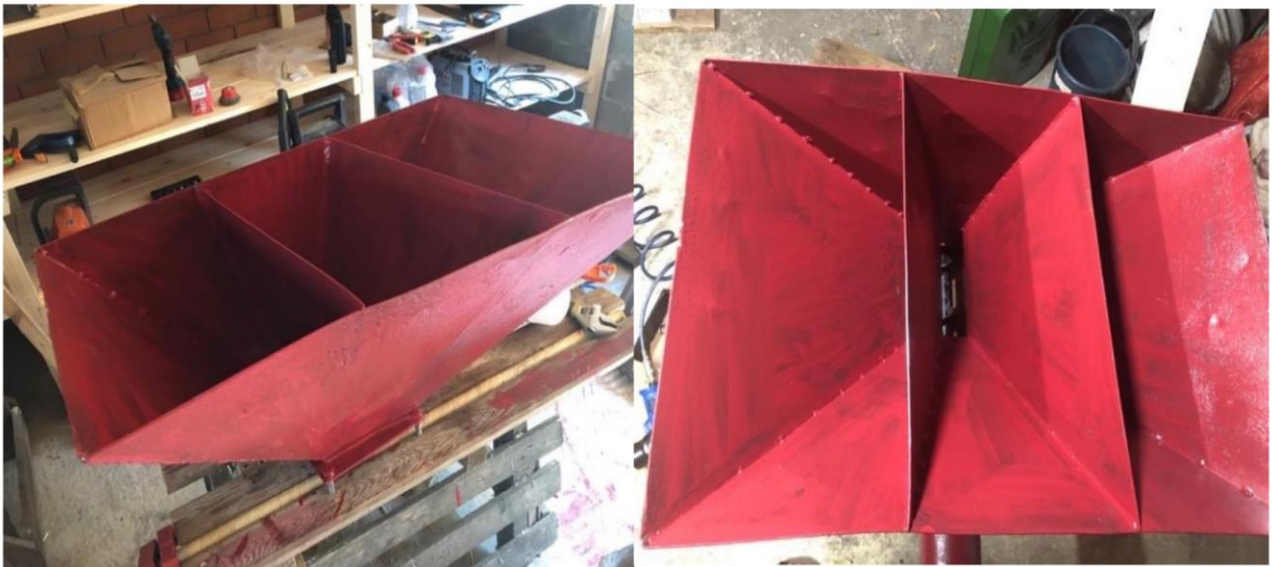


Рис. 2.6. Загальний вигляд бункера [3].

Оскільки компоненти концентрованого корму мають подібні фізико-механічні властивості та, згідно з рецептурою, змішуються у рівних пропорціях (на відміну від комбінованих кормів), вимоги до високої точності дозування

відсутні. У зв'язку з цим у даному випадку не було необхідності встановлювати шиберні заслінки на завантажувальному отворі для дозування кожного компонента. Модульна конструкція змішувача дає можливість встановлювати бункери різного об'єму та з різною кількістю секцій, а також монтувати окрему шиберну заслінку для використання за певних режимів роботи змішувача. Наприклад, це може бути необхідно у випадку використання мішалки, основною характеристикою якої є високий коефіцієнт пересипання [3].

### **2.3. Методика проведення експерименту, отримання результатів випробування дослідного зразка змішувача**

На етапі експериментальних досліджень, в якості об'єктів досліджень, при визначенні фізико-механічних властивостей використовувалися подрібнені зерна кукурудзи, подрібнені зерна пшениці та подрібнені зерна вівса.

Для визначення однорідності змішування подрібнений овес був замінений контрольним компонентом, яким є підфарбована червоним харчовим барвником пшоняна крупа (рис. 2.7.).



Рис. 2.7. Загальний вигляд контрольного компонента (підфарбована харчовим барвником пшоняна крупа)

Аналіз даних, представлених у літературних джерелах, а також результати комплексних теоретичних і експериментальних досліджень демонструють, що процес змішування кормів залежить від безлічі факторів, включаючи фізико-хімічні властивості компонентів, кінематику руху частинок і механічні параметри обладнання [3, 5].

Для ефективної оптимізації та підвищення продуктивності процесу змішування необхідно розробити його математичну модель, яка враховуватиме всі ці змінні. Це дозволить систематично описувати та прогнозувати умови змішування, а також коригувати технологічні параметри для досягнення найкращих виробничих показників.

Розглянуті фактори задовольняють критеріям керованості, оперативності, однозначності та незалежності. Фактори, що не піддаються контролю, були враховані на етапі підготовки експерименту. Через необхідність проведення великої кількості випробувань для всебічного аналізу всіх факторів було прийнято рішення про реалізацію скороченого експерименту, метою якого було виявлення факторів, що мають значний вплив на значення критерію оптимізації.

Результати однофакторних експериментів визначили рівні та інтервали варіювання для подальшого планування експерименту.

В рамках проведення експериментальних досліджень процесу змішування сухих і рідких компонентів у виробництві концентрованих кормів було проведено трифакторний експеримент. При повному факторному експерименті з трьома рівнями варіювання кожного фактора загальна кількість дослідів склала б  $N=27$ , а з урахуванням п'ятикратного відбору проб їх кількість збільшилася б до  $N=135$ . Виконання такого обсягу досліджень вимагає значних часових і матеріальних ресурсів, а також є трудомістким процесом, що диктує необхідність скорочення кількості дослідів. Для цього застосовується методологія планування експерименту. Був обраний план для трьох факторів, представлений у таблиці 3.4, що дозволило зменшити кількість експериментів до  $N=19$ , а з урахуванням п'ятикратного відбору проб їх кількість збільшилася до  $N=95$ .

Привід валу шнекового змішувача концентрованих кормів здійснювався від двигуна АІР80В4 (1,5 кВт, 1500 об/хв).

Для зняття енергетичних характеристик використовувалися прилади: цифровий мультиметр DT-832, цифрові струмомірні кліщі М266, ваги цифрові МG-100, безконтактний оптичний тахометр DT2234С+. Проведення експериментальних досліджень з змішування компонентів концентрованого корму здійснювалося без змін частоти обертання електричного двигуна. Зміна частоти обертання валу змішувача реалізовувалася в межах від 100 до 140 об/хв за допомогою зміни веденого шківa, що встановлюється на вал шнека змішувача.

### РОЗДІЛ 3

#### ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Після математичної обробки експериментальних даних отримали наступні рівняння регресії для однорідності змішування:

$$G=95,021+6,381x_1 +2,296x_2 -0,998x_3 -0,472x_1 x_2 -2,203x_1 x_3 + \\ +0,383x_2 x_3 -7,068x_1^2 -3,248x_2^2 +3,6x_3^2 . \quad (2.1)$$

Після завершення розрахунків була визначена дисперсія експерименту, яка враховує кількість ступенів свободи, позначену як  $X$ .

Після цього розрахунку гіпотеза про статистичну значущість коефіцієнтів регресійної моделі була піддана перевірці.

Для перевірки даної гіпотези першим етапом є обчислення дисперсії оцінок регресійних коефіцієнтів.

Статистична незначущість коефіцієнта інтерпретується як свідчення відсутності значущого впливу відповідного ефекту на вихідну змінну. У контексті лінійної моделі, якщо лінійний ефект виявляється статистично незначущим, це вказує на те, що в межах досліджених інтервалів зміни даний фактор не має істотного впливу на відгук.

На наступному етапі обробки даних здійснюється перевірка гіпотези про адекватність математичної моделі. Це дозволяє визначити, наскільки отримане рівняння відповідає експериментальним даним і чи достатня його складність для опису досліджуваного процесу.

Гіпотеза про адекватність зазвичай перевіряється за допомогою застосування  $F$ -критерію (критерію Фішера), який дозволяє порівнювати дисперсію, пояснену моделлю, з дисперсією, обумовленою залишками, і тим самим оцінювати відповідність моделі спостережуваним даним.

Гіпотеза про адекватність математичної моделі підтверджується в разі, якщо обчислене значення  $F$ -критерію (критерію Фішера) не перевищує його табличне значення для заданого рівня значущості. Цей підхід дозволяє

визначити, чи відповідає модель реальним даним, і забезпечує статистичне обґрунтування використання моделі для прогнозування та інтерпретації досліджуваних процесів. Рівень значущості, який зазвичай позначається як  $\alpha$ , визначає ймовірність допущення помилки першого роду, тобто ймовірність помилкового відхилення вірної гіпотези про адекватність. Аналіз через F-критерій є стандартним методом перевірки гіпотез у регресійному аналізі, що дозволяє оцінити, наскільки модель пояснює варіацію спостережуваних даних у порівнянні з помилковою варіацією, тобто коли:

Взаємозв'язки в складних системах відображаються за допомогою математичних моделей, таких як поверхні відгуку. У даному випадку, якщо поверхня відгуку моделюється як гіперболічний перетин, то центральна точка цієї поверхні, так званий сідловий вузол, характеризується умовою мінімакс. Таке явище спостерігається, коли коефіцієнти при змінних в рівнянні регресії, записаному в канонічному вигляді, мають різні знаки, вказуючи на наявність точок перегину. Ці точки перегину обумовлені комбінованим ефектом факторів, з яких одні впливають позитивно, а інші – негативно на функцію відгуку.

Для більш детального розуміння форми поверхні відгуку поблизу оптимальних умов, вдаються до аналізу двовимірних перерізів. Це дозволяє ізолювати і вивчити вплив двох конкретних змінних, в той час як інші змінні фіксуються на рівнях, що відповідають оптимізації. Це дозволяє візуалізувати вплив пар факторів, полегшуючи інтерпретацію прямих і непрямих взаємодій між змінними і їх внесок у мінливість цільової функції. Аналіз двовимірних перерізів є ключовим інструментом у багатofакторному моделюванні, оскільки він розкриває структуру реакції системи на параметри управління і допомагає у виявленні умов, які максимізують ефективність системи або мінімізують втрати.

Поверхня відгуку являє собою еліпсоїд (рис. 3.1), а її центр – екстремум, причому максимум, оскільки коефіцієнти рівняння регресії в канонічній формі від'ємні.

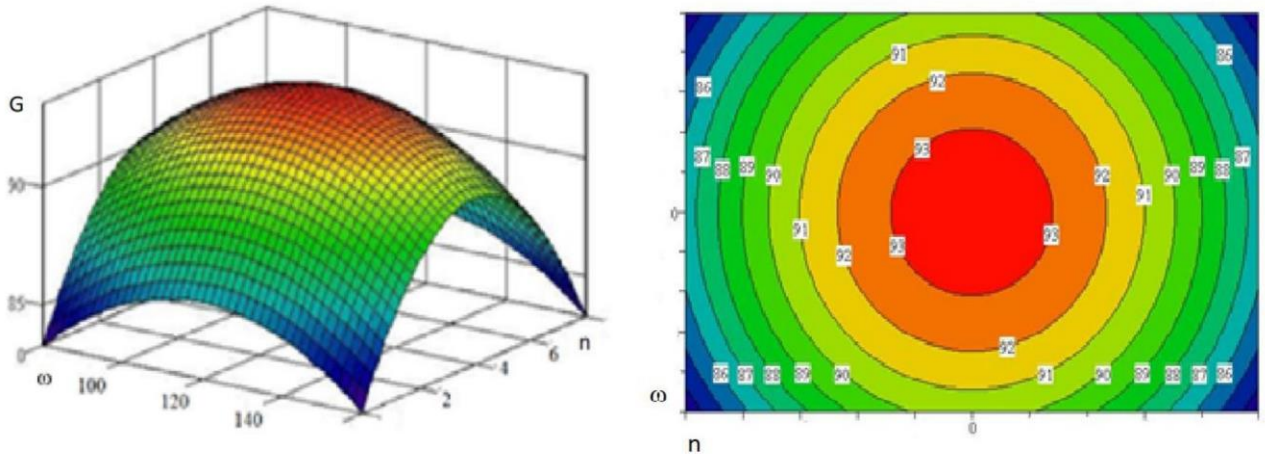


Рис. 3.1. Поверхня залежності однорідності від кількості отворів у мішалці та частоти її обертання і його двовимірний переріз.

У контексті статистичного аналізу та багатовимірної оптимізації поверхня відгуку може характеризуватися як гіперболоїдна структура. У цьому випадку центральна точка такої поверхні називається точкою міні-макса. Це обумовлено тим, що в канонічній формі рівняння регресії знаки коефіцієнтів розрізняються.

Візуальне представлення цієї моделі можна спостерігати на рис. 3.2.

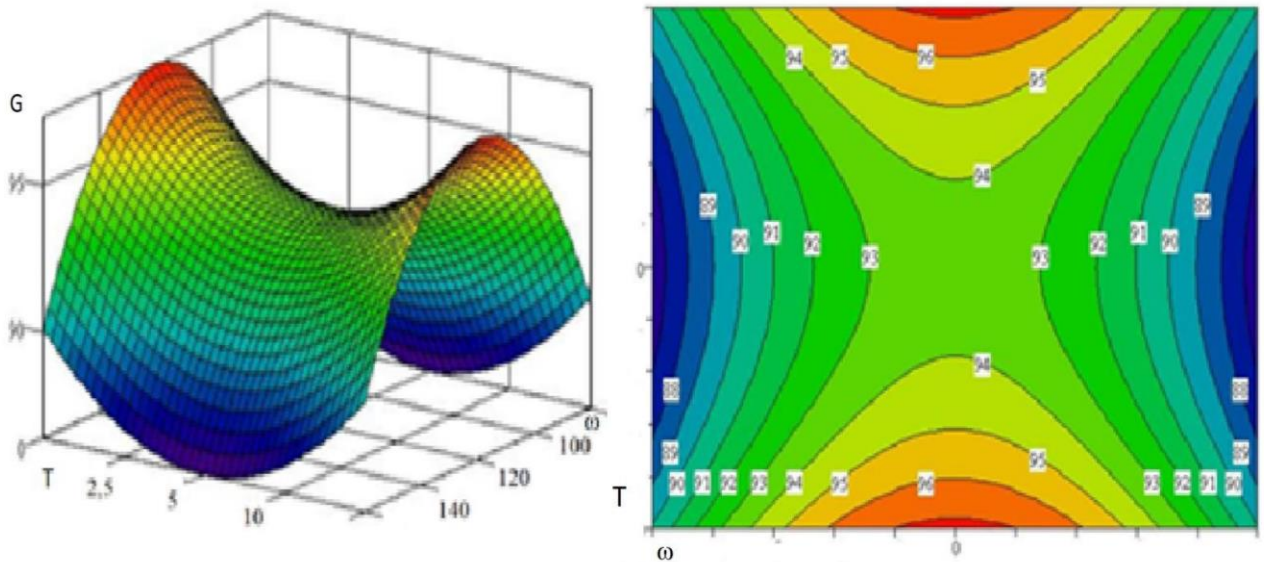


Рис. 3.2. Поверхня залежності однорідності від кількості отворів у мішалці та часу змішування і його двовимірний переріз.

В рамках аналізу багатовимірних даних, зокрема при розгляді математичних моделей відгуку, можна зіткнутися з ситуацією, коли поверхня відгуку приймає форму гіперболоїда. Центр цієї поверхні визначається як точка

мінімаксу через те, що в канонічній формі рівняння регресії є коефіцієнти з протилежними знаками. Така конфігурація вказує на те, що гіперболи, що описують відгук, розтягнуті вздовж тієї координатної осі, для якої характерне менше значення коефіцієнта за абсолютною величиною.

Для подальшого аналізу, підставляючи різні величини відгуку  $Y$  в канонічні рівняння, представлені у вигляді формули, можна отримати безліч сполучених ізоліній. Це робиться за умови фіксованої змінної, такої як  $x_3 = 1,75$ , що в контексті дає значення часу змішування, розташоване центрально в плануванні експерименту.

Візуальний розподіл змінних, що визначають однорідність в області експериментального дослідження, набуває форми, наближеної до еліпса.

Максимальний ступінь однорідності системи спостерігається за певних умов: частота обертання шнека змішувача становить 120 обертів на хвилину, а кількість отворів дорівнює чотирьом. Ці параметри забезпечують оптимальний розподіл компонентів, що змішуються.

Двовимірний переріз на площину  $X_1SX_3$  (рис. 3.3), коли  $x_2 = 120$ , тобто значення частоти обертання знаходиться в центрі плану.

У даному контексті розподіл індикаторів однорідності суміші на експериментальному полі може бути описаний в термінах геометричної поверхні, відомої як «Збіжні гребені». Аналіз демонструє, що зміна змінної  $x_1$ , що відповідає частоті обертання, значною мірою впливає на показник однорідності суміші. Ефект цієї зміни описується параболічним законом: із збільшенням частоти обертання вище центральної точки плану спостерігається зниження однорідності, тоді як збільшення часу змішування, позначеного  $x_3$ , призводить до підвищення ступеня однорідності суміші. Поглиблений аналіз двовимірного перерізу на площині  $X_1 SX_3$  і зіставлення з табличними даними дозволяють виключити, що оптимальна кількість отворів, що характеризується змінною  $x_3$ , повинна дорівнювати 4,8 для досягнення бажаної однорідності в процесі.

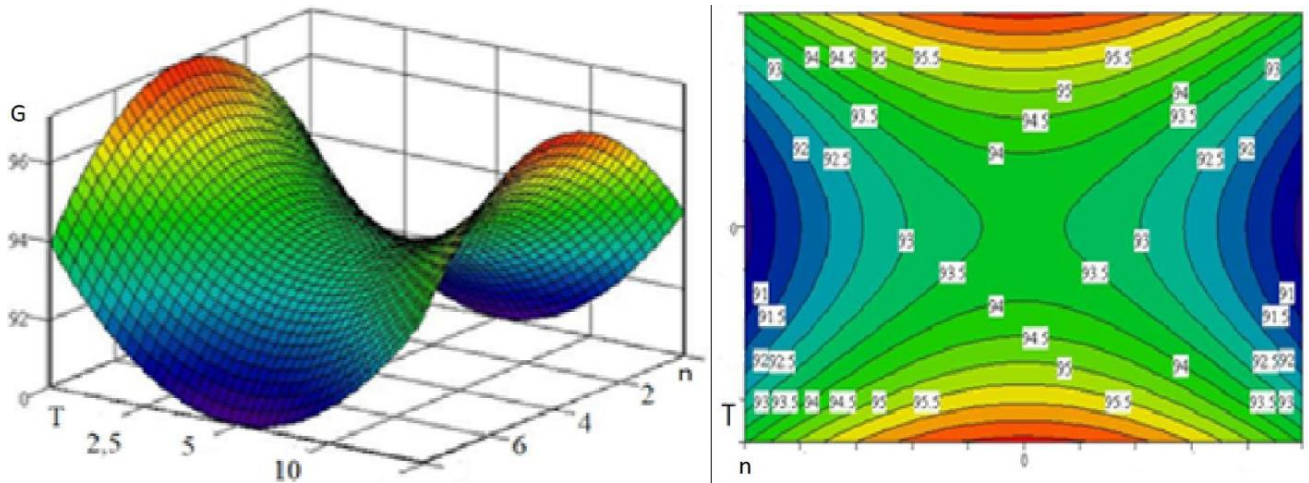


Рис. 3.3. Поверхня залежності продуктивності від частоти обертання і часу змішування і його двовимірний переріз

У цій багатовимірній системі змінних важливу роль відіграють рівняння другого порядку, що демонструють зміну результуючих характеристик на основі змінних вхідних параметрів виробничого процесу. Застосування параболічної залежності дозволяє оптимізувати умови для досягнення найкращих експлуатаційних властивостей змішувача.

В результаті проведеного аналізу можна зробити висновок, що оптимальні значення факторів лежать в межах:

- для частоти обертання  $\omega$  від 10,46 до 14,65  $\text{с}^{-1}$  ;
- для коефіцієнта пересипання  $k=0,08\dots 0,25$

При збільшенні коефіцієнта пересипання  $k$ , продуктивність безперервно знижується з 3400 кг/год до 2750 кг/год, як показано на рис. 3.4. При підвищенні частоти обертання вала шнека однорідність починає зростати, від  $g=0,9$  при частоті обертання, що дорівнює 100 об/хв, до  $g=0,922$  при частоті обертання 120 об/хв. Однак, при подальшому збільшенні частоти обертання вала змішувача до 140 об/хв, відбувається зниження однорідності кормосуміші до  $g=0,76$  (рис. 3.5). Така низька однорідність корму не відповідає вимогам, що до нього пред'являються.

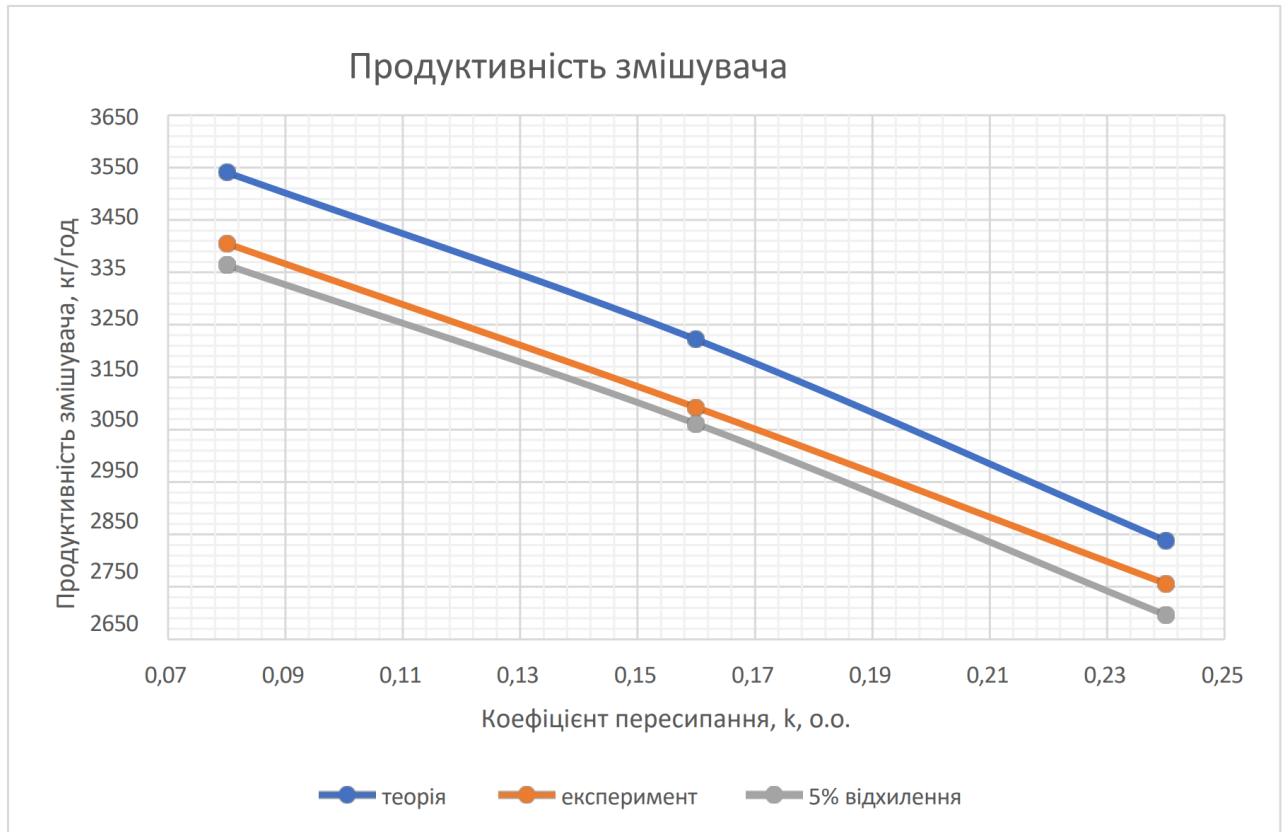


Рис. 3.4. Графік збіжності теоретичних і експериментальних результатів за продуктивності

При збільшенні коефіцієнта пересипання (від  $k=0,08$  до  $k=0,24$ ) безперервно зростає потужність ( $N=0,845$  до  $n=0,9$ ), що споживається електродвигуном (рис 3.6). З урахуванням зниження продуктивності (с  $Q=3410$  до  $Q=2750$ ) при збільшенні коефіцієнта пересипання (рис. 3.4), відбуватиметься безперервне підвищення енергоємності від  $0,248$  до  $0,334$  кВт·год/т процесу змішування с, як показано рис. 3.7.

Однорідність кормосуміші зростає (від  $G=0,9$  до  $G=0,93$ ) при збільшенні коефіцієнта пересипання (від  $k=0,08$  до  $k=0,16$ ), а при подальшому збільшенні коефіцієнта (до  $k=0,24$ ) починає знижуватися (до  $G=0,88$ ), як показано на рис. 3.8.

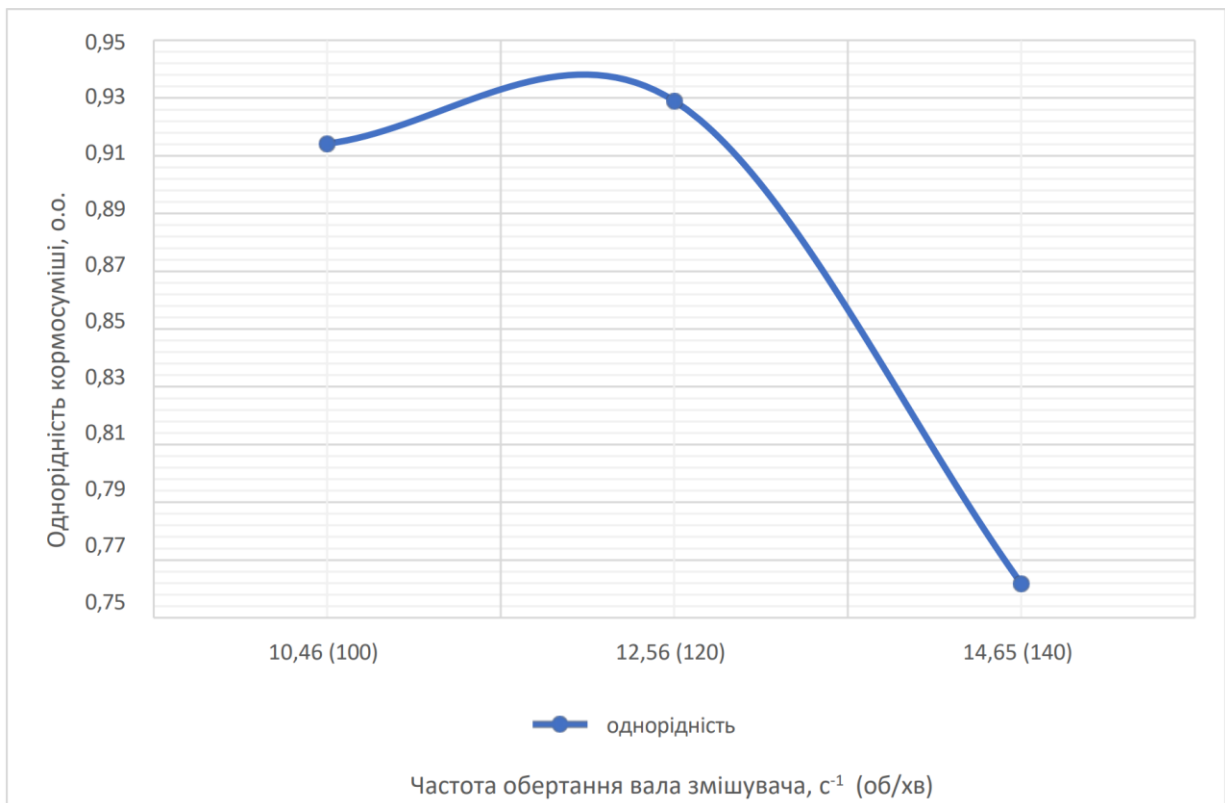


Рис. 3.5. Графік залежності однорідності корму від частоти обертання валу змішувача.

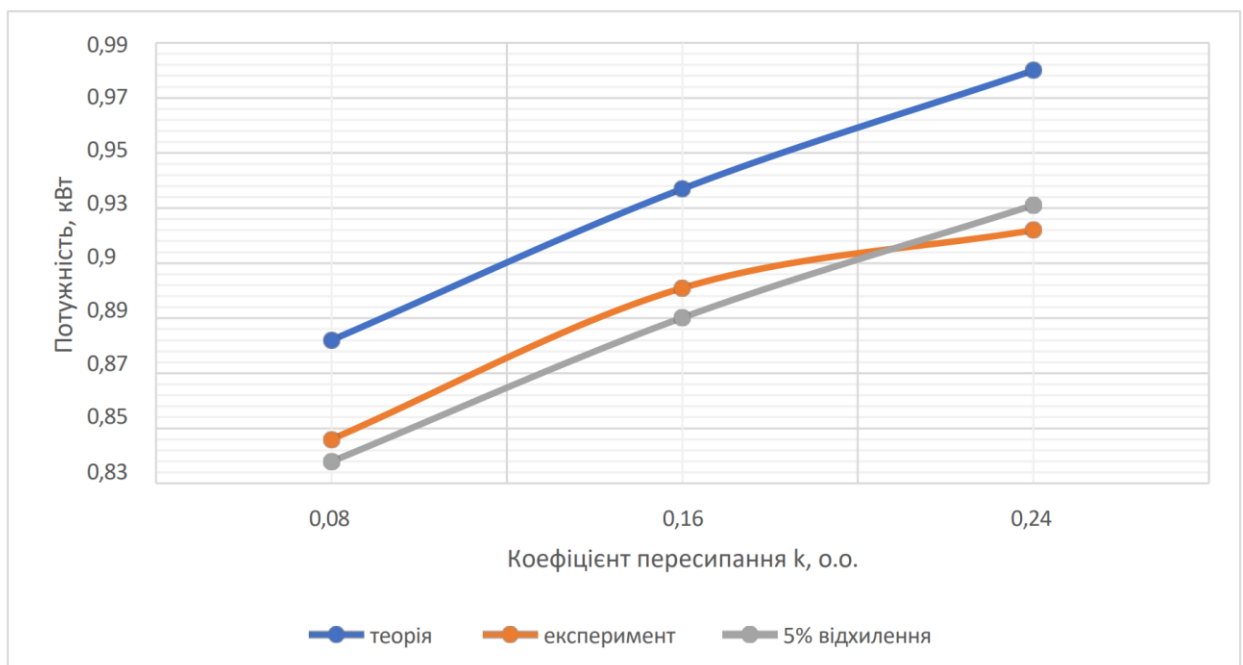


Рис. 3.6. Графік збіжності теоретичних і експериментальних результатів за потужності.

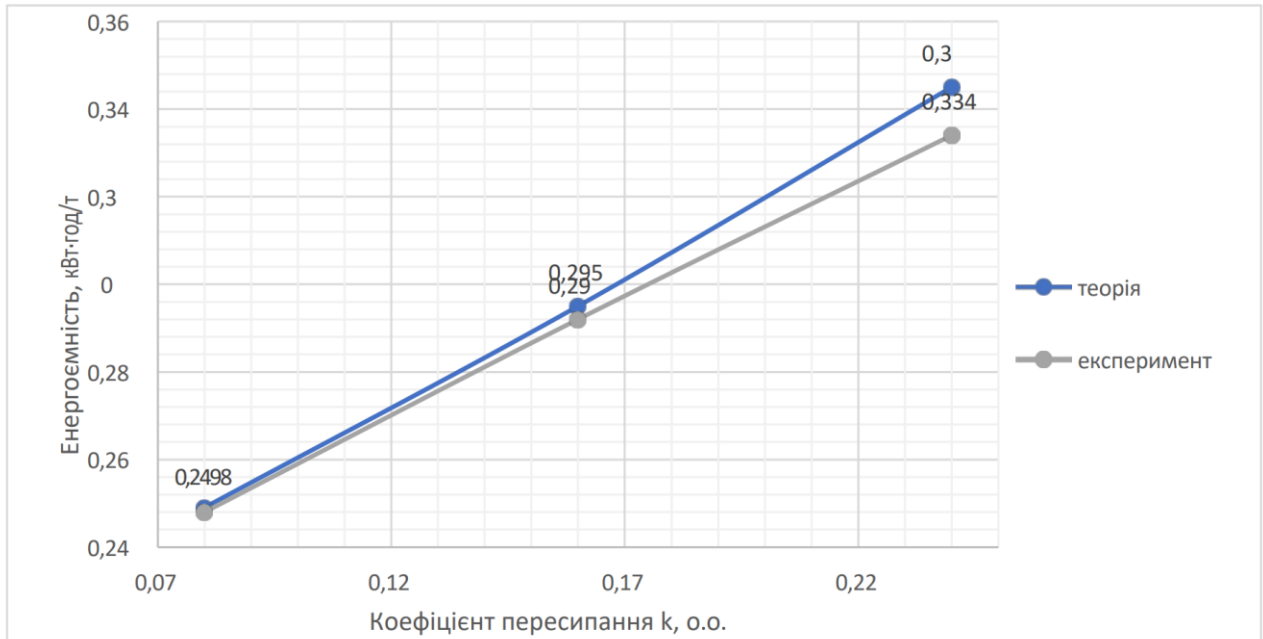


Рис. 3.7. Графік залежності енергоємності процесу змішування від коефіцієнта пересипання  $k$

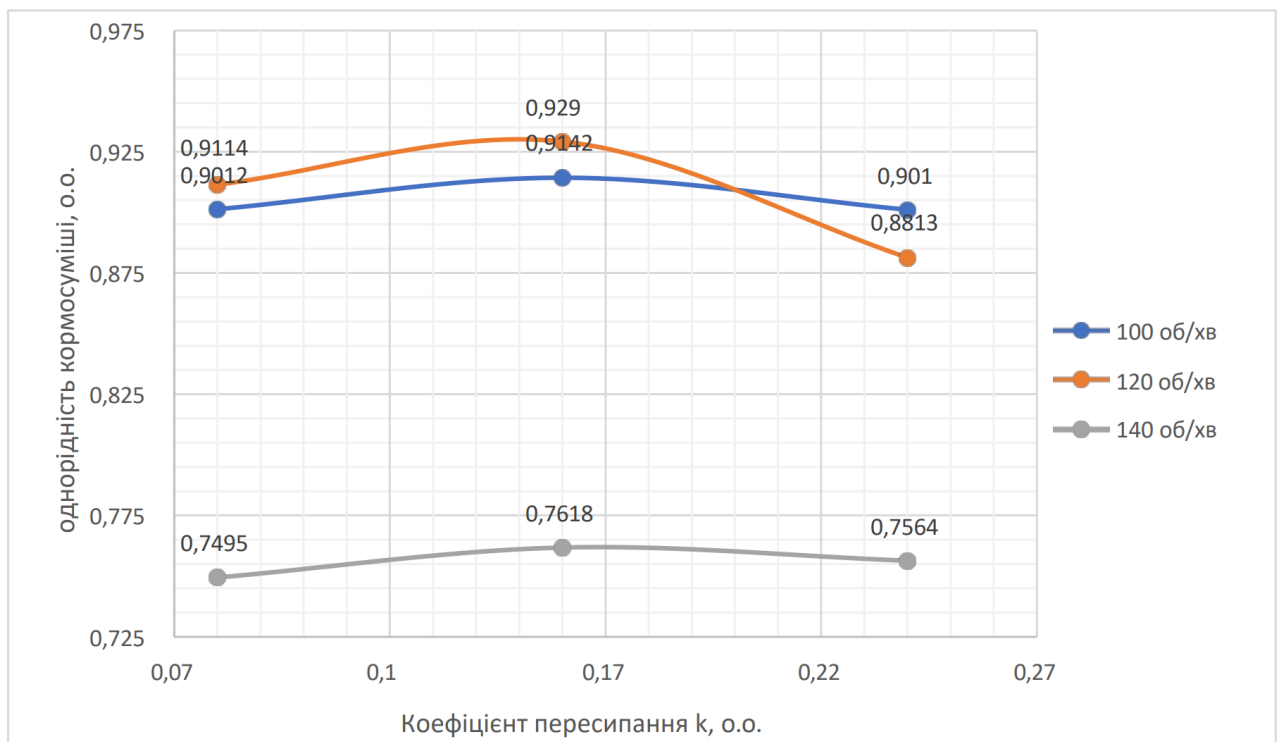


Рис. 3.8. Графік залежності однорідності корму від коефіцієнта пересипання  $k$

У процесі експериментальних досліджень вирішувалася компромісна задача між критеріями оптимізації – продуктивністю, енергоємністю та однорідністю корму, що готується, і були отримані оптимальні значення:

- для частоти обертання  $\omega=12,76 \text{ с}^{-1}$  (122 об/хв);
- для коефіцієнта пересипання  $k=0,2$

### **Висновки по розділу**

При проведенні практичних досліджень та аналізі експериментальних даних отримано наступні результати:

- виготовлено експериментальний зразок змішувача концентрованих кормів з робочим органом у вигляді шнека, оснащеного намотуванням з пересипними отворами

- експериментально отримано залежності, що характеризують технологічний процес роботи змішувача концентрованих кормів з робочим органом у вигляді шнека, оснащеного намотуванням з циркуляційними отворами;
- завдяки даним залежностям обґрунтовані оптимальні значення параметрів із встановленням ступеня збіжності теоретичних і експериментальних результатів дослідження;

- обґрунтовані та визначені конструктивні параметри змішувача концентрованих кормів з робочим органом у вигляді шнека з намотуванням, оснащеним циркуляційними отворами: частота обертання – 122 об/хв, що входить у діапазон від 100 до 140 об/хв; коефіцієнт пересипання  $k$  – 0,2, що входить у встановлений раніше теорією діапазон від 0,1 до 0,25;

- в результаті зіставлення теоретичних і експериментальних результатів встановлено: експериментальні значення потужності, споживаної електродвигуном, енергоємності процесу змішування і продуктивності змішувача від коефіцієнта пересипання укладаються в 95% довірчий інтервал аналогічних теоретичних значень.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На підставі проведеного аналізу тенденцій розвитку технічних засобів для змішування концентрованих кормів, що застосовуються на тваринницьких підприємствах АПК, вдосконалено класифікацію змішувачів концентрованих кормів, що дозволило розробити конструктивно-технологічну схему змішувача концентрованих кормів з робочим органом у вигляді шнека, оснащеного намотуванням з пересипними отворами.

Виготовлено експериментальний зразок змішувача концентрованих кормів з робочим органом у вигляді шнека, оснащеного намотуванням з пересипними отворами. Отримано математичні моделі оцінки роботи пристрою у вигляді адекватних рівнянь регресії в режимі приготування концентрованих кормів змішувачем концентрованих кормів з робочим органом у вигляді шнека, оснащеного пересипними отворами. Оптимізовано конструктивні параметри змішувача концентрованих кормів з робочим органом у вигляді шнека з намотуванням, оснащеним циркуляційними отворами: частота обертання – 122 об/хв, що входить в діапазон від 100 до 140 об/хв; коефіцієнт пересипання, 0,2, що входить у встановлений раніше діапазон від 0,1 до 0,25.

В результаті зіставлення теоретичних і експериментальних результатів встановлено: експериментальні значення потужності, що споживається електродвигуном, енергоємності процесу змішування і продуктивності змішувача від коефіцієнта пересипання укладаються в 95% довірчий інтервал аналогічних теоретичних значень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Олійник М., Ільченко А. Аналіз існуючих конструкцій змішувачів кормів. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. С. 119-126.
2. Ільченко А.В., Олійник М.О. Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми змішувача з робочим органом у вигляді шнека. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. С. 418-420.
3. Олійник М.О. Експериментальний зразок змішувача концентрованих кормів із перфорованим робочим органом. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 77-79.
4. Гевко І. Математична модель нелінійних згинних коливань шнека. Вісник ТНТУ. 2012. Том 68. № 4. С.141-154.
5. Ловейкін В. С., Яворська А. В. Математична модель динаміки руху кормозмішувача гвинтового типу. Сільськогосподарські машини, 2011. Випуск 21. С 255-264.
6. Дмитрів Д. В. Оптимізація конструктивних параметрів робочих органів кормозмішувачів. Вісник Тернопільського державного технічного університету. 2003. Т.8, №4. С. 37-43.
7. Бурлака В. І. Машини та обладнання для приготування кормів. Київ : Аграрна освіта, 2018. 312 с.
8. Кравчук В. І., Луценко М. М. Механізація тваринництва. Київ : НУБіП України, 2020. 428 с.

9. Погорілий Л. В. Технологічні процеси кормовиробництва. Київ : Урожай, 2017. 256 с.
10. Шевченко І. А., Гаврилюк О. М. Дослідження процесу змішування концентрованих кормів у шнекових змішувачах. Вісник аграрної науки. 2021. №6. С. 58–65.
11. Мельник В. О. Обґрунтування параметрів робочих органів кормозмішувачів. Механізація сільського господарства. 2019. №4. С. 22–28.
12. ДСТУ 7169:2010. Машина для приготування кормів. Загальні технічні умови. Київ : Держстандарт України, 2010.
13. Борак К. В., Куликівський В. Л. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів. Ч. 1: Теоретичні основи матеріалознавства : навч. посіб. Житомир : Поліський нац. ун-т, 2024. 101 с.
14. Bernhardt H. Futterbereitung und Fütterungstechnik. München : BLV Verlag, 2018. 384 S.
15. Schäfer R., Klein B. Technische Analyse von Futtermischern mit Schneckenarbeitsorganen. Landtechnik. 2019. Bd. 74(3). S. 176–184.
16. Müller S. Energiebedarf von Futtermischanlagen in der Tierhaltung. Agrartechnische Forschung. 2020. Bd. 26(2). S. 89–96.
17. Weber J. Optimierung der Mischprozesse in der Futtermitteltechnik. Dissertation. Universität Hohenheim, 2017. 182 S.