

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

**Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу**

**Кваліфікаційна робота
на правах рукопису**

Капінус Ілля Володимирович

УДК 636.085

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ
ВИРОБНИЦТВА КОМБІКОРМІВ З РОЗРОБКОЮ
ГВИНТОВОГО ЗМІШУВАЧА**

208 “Агроінженерія”

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

Керівник роботи

Савченко В.М.

кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Капінус Ілля Володимирович. Удосконалення технологічної лінії виробництва комбікормів з розробкою гвинтового змішувача. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

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

У кваліфікаційній роботі розглянуто існуючі технології приготування комбікормів і визначено ключові недоліки традиційних змішувальних агрегатів із точки зору енергоефективності, продуктивності та якості одержуваних сумішей.

У роботі проведено аналіз типових барабанних, лопатевих і шнекових змішувачів, сформульовано технічні вимоги до нового обладнання відповідно до фізико-механічних властивостей сипких сировинних складників. Розроблений змішувач оснащено двохзахідними гвинтовими спіралями з різним кроком, які забезпечують інтенсивне перемішування за зменшених витрат потужності.

Виконане удосконалення технологічної лінії виробництва комбікормів за допомогою розробки гвинтового змішувача дозволяє підвищити загальну продуктивність підприємства, знизити енергоспоживання та гарантувати стабільну якість готової продукції. Запропоновані технічні рішення сприяють скороченню витрат на обслуговування та ремонт устаткування завдяки застосуванню зносостійких матеріалів і простій конструкції.

Ключові слова: гвинтовий змішувач, комбікорм, технологічна лінія, шнек, технологія.

ANNOTATION

Kapinus Ilya Vladimirovich. Improvement of the feed production line with the development of a screw mixer. – Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualification work for obtaining a bachelor's degree in the specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The qualification work examines existing technologies for the preparation of mixed fodder and identifies the key disadvantages of traditional mixing units in terms of energy efficiency, productivity and quality of the resulting mixtures.

The paper analyses typical drum, paddle and screw mixers and formulates technical requirements for new equipment in accordance with the physical and mechanical properties of bulk raw materials. The developed mixer is equipped with two-entry helical spirals with different pitch, which provide intensive mixing at reduced power consumption.

The improvement of the feed production line through the development of a screw mixer allows to increase the overall productivity of the enterprise, reduce energy consumption and guarantee the stable quality of finished products. The proposed technical solutions help to reduce the cost of equipment maintenance and repair due to the use of wear-resistant materials and simple design.

Keywords: screw mixer, compound feed, production line, screw, technology.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНА ЛІНІЯ ВИРОБНИЦТВА КОМБІКОРМІВ.....	8
РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	15
РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТИВНИЙ РОЗДІЛ.....	28
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	43
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	44

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Актуальність теми дослідження визначається зростаючими вимогами агропромислового комплексу до якості та економічності виробництва комбікормів. Сучасне тваринництво потребує збалансованих кормових сумішей із високим рівнем поживних речовин та однорідністю компонентів, що безпосередньо впливає на продуктивність худоби і птиці. Водночас традиційні лінії приготування комбікормів мають низку недоліків: нераціональне енергоспоживання, недостатня інтенсивність змішування та обмежена можливість точного дозування кількох складових. Це призводить до зниження якості кінцевої продукції, збільшення питомих витрат ресурсів і, як наслідок, падіння рентабельності виробництва.

Розробка гвинтового змішувача як ключового вузла технологічної лінії сприяє усуненню цих проблем завдяки оптимізації геометрії робочих органів, зниженню тертя сипких матеріалів та підвищенню однорідності сумішей при менших енерговитратах. Інтеграція такого змішувача дозволяє забезпечити безперервний процес дозування, транспортування й перемішування компонентів, що спрямоване на мінімізацію людського фактора та скорочення простоїв обладнання. В умовах посилення конкуренції на ринку комбікормів з'являється необхідність у впровадженні інноваційних технічних рішень, які гарантуватимуть високу якість кормів при оптимальних витратах.

Таким чином, удосконалення технологічної лінії виробництва комбікормів із розробкою гвинтового змішувача є вкрай актуальним завданням, оскільки воно дозволяє підвищити енергоефективність, продуктивність та якість кормових сумішей, що, в свою чергу, сприятиме сталому розвитку тваринницької галузі й зміцненню продовольчої безпеки країни.

Метою роботи є підвищення ефективності технологічної лінії виробництва комбікормів шляхом розробки й впровадження вдосконаленого гвинтового змішувача, який забезпечить оптимальне дозування компонентів,

збільшить однорідність суміші при зменшених енерговитратах і підвищить загальну продуктивність виробництва.

Завдання дослідження:

- провести аналіз технологічних процесів сучасного виробництва комбікормів та визначити основні недоліки існуючих ліній у частині змішування;
- дослідити конструкції та принципи роботи різних типів змішувачів (барабанних, лопатевих, шнекових) з урахуванням їх енергоефективності та якості однорідності суміші;
- розробити технічні вимоги до гвинтового змішувача з урахуванням фізико-механічних властивостей сипких компонентів комбікорму, вимог до точності дозування та мінімальних енерговитрат;
- спроектувати конструкцію гвинтового змішувача з оптимізованою геометрією спіралей, кутами нахилу та системою завантаження;
- виконати розрахунки основних параметрів змішувача.

Об'єктом дослідження є технологічна лінія виробництва комбікормів, зокрема процес змішування сипких компонентів.

Предмет дослідження: конструкція та технологічні параметри гвинтового змішувача для забезпечення високої однорідності суміші при мінімальних енерговитратах.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Борак К.В., Герасимчук Д.В. Савченко В.М., Савін Н.Л., **Капінус І.В.** Стан матеріально-технічної бази агропромислового комплексу України: аналіз останнього десятиліття. Збірник тез доповідей XI Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь» з нагоди 30-річчя започаткування підготовки ОС «Бакалавр» за спеціальністю «Агроінженерія» 11 квітня 2025 року м. Житомир / МОН України, Житомирський агротехнічний фаховий коледж. Київ. Видавничий центр ЖАТФК України, 2025. С. 54-58.

2. **Капінус І.В.** Стан кормовиробництва в Україні. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали V Міжнар. наук.-практ. конференції молодих учених (Запоріжжя, 03-28 лютого 2025 р.). Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. С. 136-138

Практичне значення одержаних результатів. Впровадження розробленого гвинтового змішувача дозволяє підвищити однорідність готового комбікорму за рахунок оптимізованої геометрії спіралей і системи дозування, що позитивно впливає на кінцеві показники продуктивності та здоров'я тварин. Впровадження розробленої моделі забезпечує стабільну продуктивність лінії (понад 15 т/год) та знижує простой, що сприяє безперервності виробничого процесу й підвищенню рентабельності комбікормового цеху.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 26 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 45 сторінок комп'ютерного тексту, містить 6 рисунків та 2 додатки.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЧНА ЛІНІЯ ВИРОБНИЦТВА КОМБІКОРМІВ

Перший етап технологічної лінії виробництва комбікормів починається з прийому та зберігання сировини. Закуплені зернові культури, макуха, шрот та інші компоненти доставляють до складу підприємства, де їх розміщують у спеціалізованих силосах або бункерах. Зберігання сировини передбачає підтримання оптимальної вологості та температури, щоб попередити пліснявіння й псування корму. Одночасно закладається система обліку та маркування партій сировини для відстеження її походження та якості. Правильне зонування приміщень дозволяє мінімізувати ризик перехресного забруднення. Важливим завданням на цьому етапі є організація ефективної логістики внутрішньозаводських переміщень із застосуванням стрічкових чи шнекових транспортерів. Забезпечення умов для оперативного забору та видачі сировини безперечно впливає на безперервність подальших операцій технологічної лінії [2].

Другий етап включає очищення сировини від домішок та пилу. Після приймання сировину направляють на очищувачі, які можуть бути декількох типів: гравітаційні сепаратори, ситові очищувачі або магнітні видалювачі металевих часток. Застосування багатоступеневої системи очищення забезпечує видалення пилу, дрібного сміття, камінців та металевих фрагментів, що гарантує безпеку роботи обладнання та якість майбутнього продукту. Очистка необхідна для запобігання пошкодження шнеків, ножів подрібнювачів та прес-грануляторів. Згідно з практичною рекомендацією, частка домішок у зерні не повинна перевищувати 2 % від маси сировини. Після проходження очищення кормові компоненти накопичуються у вимірних бункерах, з яких автоматизовано подаються до наступного блоку. Ефективна робота цього вузла здешевлює виробництво за рахунок зменшення простоїв і ремонту обладнання [2-4].

Третій етап – подрібнення компонентів на дробарках або молоткових млинах. Подрібнення необхідне для забезпечення оптимального розміру частинок, що сприяє кращому засвоєнню поживних речовин тваринами. Згідно з технологічними вимогами, фракція подрібненої сировини для зернових культур має становити 2–3 мм, а для макухи — 1,5–2 мм. Використання сит із різними отворами дає змогу регулювати кінцевий розмір частинок залежно від виду тварин (птиця, свині, ВРХ тощо). При подрібненні необхідно стежити за температурним режимом, адже надмірне нагрівання може знизити вміст амінокислот та вітамінів у кормі. Подрібнена суміш автоматично транспортується до змішувача за допомогою пневмотранспорту. Правильна ступінь подрібнення є критичною для процесів гранулювання та споживчих властивостей готового комбікорму [1-8].

Четвертий етап технологічної лінії – зважування та точне дозування компонентів. Після подрібнення кожен інгредієнт проходить через вагове узагальнююче обладнання, що контролює пропорції за рецептурою. Дозатори можуть бути гравітаційними, шнековими чи вакуумними, залежно від сипучості та властивостей кормових добавок. Система автоматичного контролю дозування забезпечує високу точність складання суміші, що безпосередньо впливає на збалансованість поживних речовин. Надходження компонентів у змішувач відбувається у заздалегідь визначених пропорціях відповідно до технологічної карти виробництва. Для уникнення похибок мережева система управління зберігає кілька базових рецептур під різні види сільськогосподарських тварин. Це дозволяє оперативно змінювати рецептуру у разі зміни доступності сировини чи потреб виробництва [3-8].

П'ятий етап передбачає гомогенне змішування компонентів у вертикальних або горизонтальних змішувачах. Змішувачі можуть бути камерного типу з нижнім чи верхнім вивантаженням продукту. Горизонтальні змішувачі із двома спіральними лопатками забезпечують рівномірну циркуляцію маси, що важливо для рівномірного розподілу вітамінно-мінеральних добавок та фосфорно-кальцієвих компонентів у суміші. Час

змішування варіюється від 5 до 10 хвилин, що залежить від обсягу партії та конструкції агрегату. Під час процесу автоматично відбувається контроль вологості та температури суміші, щоб запобігти надмірному нагріву та збільшенню вологості, що негативно впливає на властивості пелет. Надійна індикація рівня наповнення корпусу змішувача дозволяє своєчасно завершувати цикл і запускати процес вивантаження. Закінчення змішування сигналізується автоматичною системою керування, після чого продукт надходить до наступного етапу – кондиціонування [4].

Шостий етап – кондиціонування суміші, яке здійснюється в кондиціонерах з подачею пари або гарячої води. Завдання кондиціонування – розм'якшити крохмаль і підготувати суміш до гранулювання, покращуючи її зв'язуючі властивості. Температура в камері кондиціонування зазвичай підтримується на рівні 75–85 °C протягом 15–20 хвилин. Під впливом вологи та тепла відбувається часткова денатурація білків та желатинізація крохмалю, що сприяє кращому спікненню пелет. Також під час цього етапу додають рідкі жири, олії та ароматизатори, які рівномірно перемішуються в об'ємі суміші. Пропарювання є критичним для зниження навантаження на прес-гранулятор та забезпечення потрібної вартості кінцевого продукту за рахунок економії електроенергії. Контроль вологості вихідного матеріалу здійснюється вбудованими датчиками, що гарантує оптимальні умови для процесу гранулювання [8].

Сьомий етап технологічної лінії – гранулювання або пресування в прес-грануляторі. Прес-гранулятор – ключове обладнання, де з суміші утворюються пелети потрібного діаметра й довжини. Матові або волоочильні матриці можуть мати різну форму отворів: круглі, овальні чи шестикутні, залежно від виду птахів або тварин, яких годуватимуть цим кормом. При зміні рецептури або ваги компонентів оператор встановлює необхідний тиск і температуру в зоні нагріву матриці. Оптимальний тиск зазвичай коливається від 20 до 50 Бар, що дозволяє отримати щільні пелети без тріщин і розшарувань. Швидкість обертання шнека регулюється електроприводом із частотним регулятором, що

забезпечує стабільну подачу маси. Якість гранулювання перевіряється на стенді контролю: пелети тестуються на міцність, розмір і рівень зараженості шкідливими мікроорганізмами. Надійна робота пресу гарантує високий вихід готової продукції та мінімізує невиконання технологічного циклу [9].

Восьмий етап передбачає охолодження свіжогранульованих пелет у охолоджувачах різного типу – зворотно-потоккових або вібраційно-охолоджувальних. Мета охолодження – знизити температуру пелет до 30–35 °С, щоб стабілізувати їхню структуру та знизити вологість до оптимальних 12–14 %. Якщо випускати гарячі пелети одразу в фасувальний цех, пелети можуть розтріскуватися або злежуватись, що позначається на їхній зовнішній якості та механічній міцності. Охолодження відбувається за допомогою потоку прохолодного повітря, яке рівномірно розподіляється в масі пелет. В деяких сучасних лініях використовується рекуперація тепла з метою економії енергії: тепле повітря, що видаляється, передає частину тепла зовнішньому контуру. Вихідна продукція зі стану охолодження переходить до просіювального агрегату для видалення пилу та дрібних фракцій. Ефективність охолодження контролюється температурними сенсорами у верхньому й нижньому шарах шару пелет [11].

Дев'ятий етап – просіювання та очищення охолоджених пелетів від поверхневого пилу й дрібних часток. Просіювачі бувають дискові, вібраційні або кругові, і дозволяють усунути до 3 % дрібної фракції, яка може негативно вплинути на смакові властивості та засвоюваність корму. Після просіювання сортувальні гільзи відкидають під пиłosосний агрегат для утилізації або зворотного подрібнення до етапу гранулювання. Основну продукцію, що відповідає заданим параметрам, направляють у накопичувачі готової продукції. При цьому забезпечується суворий контроль розміру пелет і вмісту залишкової вологості. Система виявлення металевих домішок із магнітними сепараторами встановлюється на виході просіювача, щоб гарантувати відсутність металевих частинок у готовому продукті. Вібраційні просіювачі з регульованою амплітудою вібрації дають змогу адаптувати процес до будь-якого типу пелет

та пропускної здатності. Це сприяє підвищенню чистоти високоякісного корму й зниженню втрат продукту [12].

Десятий етап – фасування та пакування готових пелетів. Використовують автоматизовані лінії фасування в поліпропіленові чи паперові мішки ємністю 20–50 кг або дозувальні ваги для насипного обладнання великої ємності (силоси, бункери). Вбудовані звукові та світлові сигналізатори інформують оператора про можливі перебої у подачі корму чи неправильно завантажені або пошкоджені пакети. Деякі виробники застосовують системи на основі QR-кодів та RFID-міток для ідентифікації партії та відстеження терміну придатності. Правильне маркування включає вказівку дати виробництва, найменування партії, склад і вага продукції. Автоматичні зважувальні машини дозволяють забезпечити похибку не більше $\pm 0,5$ % від заданої ваги пакета. Паковані мішки транспортують на склад готової продукції за допомогою конвеєрних ліній або навантажувачів. Це дає змогу автоматизувати складський облік та полегшує відвантаження клієнтам [6].

Одинадцятий етап передбачає контроль якості готового комбікорму. Зразки відбираються з кожної партії та направляються в лабораторію для визначення хімічного складу, вмісту протеїну, клітковини, золи, вологості та енергетичної цінності. Також проводиться мікробіологічний аналіз для виявлення патогенних бактерій, дріжджів і пліснявих грибів. Для оцінки фізичних властивостей проводять тест на ломаємість пелет, тест на довжину та діаметр, а також визначають концентрацію пилу. Відхилення від нормативів призводить до повернення партії на коригувальну дію: пелети можуть бути додатково пересушені, подрібнені або систему гранулювання регулюють повторно. Результати аналізів документуються у картках якості та впливають на можливість реалізації партії. За потреби готовий корм піддається пакуванню з фумігацією для знищення шкідників, що забезпечує довготривале зберігання [4].

Дванадцятий етап – зберігання готової продукції на складі з контролем мікроклімату. Склад готової продукції має бути обладнаний системою

вентиляції та кондиціювання повітря, щоб підтримувати температуру 15–20 °C і вологість 60–65 %. Такі умови запобігають розвитку плесні та втраті поживної цінності корму. Готові пакети укладають на піддони з дотриманням правил щодо максимального навантаження, щоб уникнути продавлювання мішків. Для кормів у насипному стані використовують силосні ємкості зі спеціальними вентиляційними каналами. Проводять періодичний моніторинг вологості та температури у різних зонах складського приміщення за допомогою цифрових датчиків. Організовано ротацію партій за принципом FIFO (first in, first out) для забезпечення своєчасного використання найстаріших кормів. При відвантаженні передбачена процедура перевірки цілісності пакування та вихідних документів за партіями [4].

Тринадцятий етап – відвантаження готової продукції споживачам. Для цього використовують конвеєрні стрічки або навантажувальну техніку (вилкові навантажувачі, бункери із завантажувачами). При масових відвантаженнях реалізується насипний відвантажувальний комплекс, що дозволяє подавати пелети безпосередньо в кузов вантажівки або на бункерні платформи. Перед відвантаженням оператор перевіряє супровідну документацію: сертифікат якості, рахунок-фактуру, товарно-транспортну накладну. Також пересвідчується, що вага вказана у накладних відповідає даним зважування на фасувальних машинах. Важливо дотримуватися правил безпеки під час навантажувально-розвантажувальних робіт, щоб уникнути падінь пакунків та травмування персоналу. Для запобігання конденсації вологи під час транспортування у зимовий період вузли відвантаження можуть бути обладнані підігрівом чи ізоляцією. Ефективна організація транспортування та логістики гарантує своєчасне постачання корму на ферми споживачів [7].

Чотирнадцятий етап – технічне обслуговування та ремонт технологічного обладнання. Для забезпечення безперебійної роботи лінії слід регулярно проводити профілактичні огляди, мастило рухомих частин, заміну зношених компонентів та калібрування датчиків. Графік технічного обслуговування встановлюється на основі рекомендацій виробників обладнання та

інтенсивності використання лінії. Особливо важливо контролювати стан матриць прес-грануляторів, ножів подрібнювачів і транспортерів, де через абразивне навантаження швидко з'являється знос. Наявність мінімального запасу критичних запчастин (підшипники, ремені, мотор-редуктори) дозволяє уникнути тривалих простоїв у випадку аварійного виходу з ладу. Також необхідно проводити періодичні перевірки електричних щитів, автоматичних запобіжників та інверторів, щоб попередити короткі замикання й аварійні зупинки. Ведення журналу технічного обслуговування та аналіз причин зупинок допомагають оптимізувати витрати на ремонт і підвищити продуктивність лінії [6].

П'ятнадцятий етап – впровадження автоматизованих систем управління технологічним процесом (АСУТП). Сучасні комбікормові лінії обладнують централізованим комп'ютерним управлінням, яке контролює всі операції — від надходження сировини до фасування готової продукції. Завдяки цьому досягається мінімізація людського фактору та підвищення точності дозування й стабільності якості. АСУТП дозволяє інтегрувати систему в SCADA-платформу, що дає змогу віддалено моніторити параметри роботи обладнання, переглядати історію змін і проводити аналітику у режимі реального часу. За допомогою інтелектуальних алгоритмів здійснюється оперативне коригування швидкостей транспортерів, режимів подрібнення та гранулювання в залежності від вологості та складу сировини. Автоматизоване формування звітів про виробіток, споживання енергоресурсів і виключення простоїв значно скорочує витрати на виробництво. Таким чином, впровадження АСУТП є ключовим фактором підвищення ефективності та економічної доцільності роботи комбікормових підприємств [2-4].

Розрахунок технологічної лінії та проектування цеху представлено в додатку А

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Технологічний процес змішування сипких матеріалів сільськогосподарського призначення

Технологічний процес змішування сипких матеріалів сільськогосподарського призначення передбачає отримання однорідної суміші різнорідних компонентів шляхом механічного впливу на зернові культури, кормові суміші, добрива та інші сипкі речовини. Основна мета цього процесу – забезпечити рівномірний розподіл поживних речовин або хімічних добавок у готовій продукції, що безпосередньо впливає на якість кормів або ефективність внесених добрив. Змішування дозволяє підвищити продуктивність тваринництва, покращити фізико-хімічні показники ґрунту та оптимізувати витрати ресурсів. Технічно процес складається з декількох стадій: завантаження вихідних компонентів, власне змішування, вивантаження готової суміші та контроль якості. Кожна зі стадій вимагає точного дотримання режимів роботи обладнання й технологічних параметрів. Недостатня однорідність чи помилки в дозуванні можуть призвести до нерівномірного живлення тварин або несправного внесення добрив, що знижує ефективність виробництва. Отже, ретельне проектування та налагодження змішувального процесу є критичним чинником у агропромислових підприємствах [15].

Сипкі матеріали сільськогосподарського призначення охоплюють широкий спектр компонентів, зокрема зернові (кукурудза, пшениця, ячмінь), бобові, шроти, макуха, комбікормові концентрати, мінеральні добрива (аміачна селітра, суперфосфат), вапняковий порошок та інші добавки. Грануляти кормових компонентів можуть відрізнятися за розміром частинок, формою й питомою густиною, що суттєво впливає на механізм роботи змішувача. До того ж у процесі виробництва часто використовуються вітаміно-мінеральні добавки у вигляді порошків чи дрібнозернистих фракцій, які мають властивість

силосуватися або злежуватися при неправильному зберіганні. Важливою складовою частиною є також різноманітні технологічні добавки – піногасники, протислипні агенти, які додаються у невеликих кількостях для поліпшення фізичних властивостей суміші. Безпосередньо перед змішуванням всі компоненти піддаються очистці від домішок, що забезпечує захист обладнання та рівномірність наступних етапів технології. Таким чином, знання фізико-механічних властивостей кожного сипкого матеріалу є ключовим для формування правильної рецептури суміші та вибору оптимального обладнання [6].

Основною ціллю процесу змішування є досягнення необхідного ступеня однорідності, коли концентрація кожного компонента в різних ділянках суміші не відхиляється від середнього значення більше ніж на допустимий відсоток (зазвичай 2–5 %). Однорідність сприяє покращенню якісних характеристик комбікормів – кращий смак, підвищена засвоюваність поживних речовин та зниження ризику утворення небажаних кластерів частинок. Аналогічно, для сумішей добрив рівномірність розподілу мінералів забезпечує їхню ефективність у подальшому внесенні в ґрунт. Відхилення від належного рівня однорідності може призвести до нерівномірного годівельного навантаження тварин або нерівномірного засвоєння добрив у полі, що негативно впливає на продуктивність і рентабельність. Контроль однорідності здійснюють шляхом відбору проб у різних точках робочого об'єму змішувача та проведення аналізу на вміст основних компонентів. Сучасні технології передбачають автоматичні системи моніторингу, які в режимі реального часу оцінюють однорідність суміші за допомогою візуальних сенсорів, оптичних приладів чи методів спектроскопії [3].

До процесу змішування передбачається декілька підготовчих операцій, зокрема очищення, сортування та подрібнення сипких матеріалів. На цьому етапі видаляються домішки – каміння, великий пил, залишки соломи або сторонні предмети, які можуть пошкодити обладнання чи негативно вплинути на якість суміші. Сортування виконують за допомогою ситових очищувачів та

магнітних сепараторів, що забезпечує видалення дрібного сміття та металевих часток. Подрібнення необхідне для уніфікації розміру зернових фракцій: при виробництві комбікормів рекомендований розмір частинок становить 2–3 мм, що сприяє кращому змішуванню та легшому проходженню через прес-гранулятор на наступних етапах. Подрібнена сировина тимчасово накопичується у бункерах, звідки автоматизовано подається до вагового відділення. Кожен компонент попередньо зважують, дотримуючись технологічної карти, щоб уникнути відхилень у рецептурі. Інколи застосовують попереднє кондиціювання – зволоження легких порошків для зменшення злежування й запобігання утворенню пилу під час змішування [11].

Класичні типи змішувачів для сипких матеріалів в аграрному виробництві включають гравітаційні, стрічкові (ріббонні), лопаткові, барабанні та роторні конвеєрні системи. Гравітаційні змішувачі дозволяють компонентам змішуватися за рахунок їхнього власного руху під дією сили тяжіння, що сприяє збереженню структури крихких фракцій і зменшує енергомісткість процесу. Стрічкові змішувачі оснащені двома спіральними стрічками, що переміщують матеріал у протилежних напрямках, забезпечуючи інтенсивне сумішоутворення й одночасну циркуляцію всього об'єму усередині корпусу. Лопаткові змішувачі працюють за принципом піднімання та перекидання шару сипкої маси, що створює високу інтенсивність перемішування. Барабанні змішувачі призначені для обережного змішування кормів: обертання циліндра піднімає суміш, яка потім падає і перемішується під дією тертя об стінку барабана. Роторні конвеєрні змішувачі здійснюють переміщення та сумішоутворення за допомогою обертового ротора з лопатками. Вибір конкретного типу залежить від фізико-механічних властивостей компонентів, обсягу партії та вимог до однорідності [8].

Механізми змішування сипких матеріалів зазвичай включають конвективний, дифузійний та зсувний процеси. Конвективне змішування відбувається через переміщення групи суміжних частинок, коли маса переміщується під дією робочих органів змішувача чи обертання барабана.

Дифузійне змішування полягає у поступовому перерозподілі окремих частинок різних компонентів через свіжостворені межі розділу, коли маса матеріалу знаходиться в стані стохастичного руху. Процес зсуву характерний для стрічкових чи лопатевих змішувачів, у яких внутрішні й зовнішні стрічки або лопатки переміщують продукт у протилежних напрямках, викликаючи інтенсивне перетікання матеріалу. Комбінація цих механізмів визначає швидкість одержання однорідної суміші й її якість. Внаслідок відмінності фізико-механічних властивостей компонентів може виникати сегрегація – самовільне розділення суміші за розміром, формою чи густиною частинок. У конструкції змішувача прагнуть оптимізувати співвідношення механізмів для мінімізації прояву сегрегації та досягнення необхідного рівня однорідності [15].

Параметри процесу змішування включають час циклу, заповнення змішувача (фактор заповнення), швидкість обертання ротора або частоту обертів барабана, а також режими подачі матеріалів. Оптимальний час змішування варіюється залежно від обсягу маси та типу змішувача й зазвичай складає від 3 до 10 хвилин для стрічкових та роторних установок. Фактор заповнення (заповненість робочого об'єму) найчастіше коливається в межах 50–70 % для забезпечення достатнього простору перемішування та мінімізації “мертвих зон”, де суміш рухається повільніше. Швидкість обертання ротора в стрічкових змішувачах регулюють, щоб уникнути надмірного нагріву або руйнування крихких компонентів, а в барабанних установках — для підтримання потрібної висоти підйому суміші на внутрішню стінку для ефективного падіння й перетікання. Подача матеріалів у змішувач може бути періодичною (batch-type) або безперервною (continuous), що безперервні системи забезпечують менш коливні показники однорідності, але потребують складнішого обладнання. Важливо підтримувати сталу подачу компонентів відповідно до рецептури, використовуючи точні дозатори, щоб уникнути відхилень у складі суміші [13].

Однією з головних проблем у процесі змішування є сегрегація готової суміші, коли частинки різного розміру або щільності переміщуються по різних

зонах змішувача під дією гравітаційних сил. Це особливо актуально при обробці сумішей із великою дисперсністю компонентів – наприклад, дрібнозернисті порошки й великі гранули. При надмірному заповненні змішувача або недостатньому рівні енергії перемішування дрібні частинки можуть опускатися вниз, а важкі – підніматися вгору, що призводить до утворення “мертвих” зон. Інші виклики включають утворення містків (bridging) між частинками, що може блокувати подачу матеріалу у змішувач і спричинити нерівномірну роботу. Підвищена вологість деяких компонентів призводить до злежування та утворення грудок під час обробки, що ускладнює процес. Абразивні властивості важких мінеральних добавок спричиняють прискорений знос робочих органів та корпусу обладнання. Для подолання цих проблем застосовують комбіновані механізми змішування (поєднання конвекції, дифузії та зсуву), корегують конструкцію внутрішніх органів змішувача та оптимізують фізико-хімічні властивості компонентів (сушіння, кондиціювання) [5].

Якість одержаної суміші оцінюють шляхом відбору репрезентативних проб із різних точок змішувача або транспортної лінії. Зразки аналізують на вміст основних компонентів — протеїну, клітковини, вологи, мінеральних речовин (для кормів) або на концентрацію мікроелементів (для добрив). Статистичні методи оцінки включають визначення коефіцієнта варіації (КВ) у показниках складу; для комбікорму прийнятний КВ не повинен перевищувати 10–15 %. Для дослідження фізичної однорідності застосовують методи ситового аналізу та оптичної експертизи, визначаючи розподіл фракційної структури й наявність агломератів. У деяких лабораторіях використовують автоматизовані прилади, що дають змогу отримувати характеристику однорідності за спектральними ознаками або за допомогою сенсорних камер. Оцінювання якості суміші проводять як під час розробки технологічного процесу, так і періодично під час серійного виробництва з метою контролю стабільності режимів і досягнення технологічних показників. За потреби партію відправляють на доопрацювання – додаткове змішування або подрібнення [2].

Автоматизація процесу змішування суттєво підвищує стабільність та ефективність роботи технологічної лінії. Сучасні системи управління (АСУТП) інтегрують датчики ваги, вологості, температури та оптичні сенсори для моніторингу в реальному часі параметрів суміші й обладнання. Сигнал із вагових дозаторів автоматично коригує подачу компонентів, забезпечуючи точне дотримання рецептури без необхідності постійного втручання оператора. Для контролю температурного режиму в середині змішувача використовують інфрачервоні чи контактні датчики, які попереджають про можливе перегрівання, що негативно впливає на вміст вітамінів і біологічно активних речовин. SCADA-платформи дозволяють накопичувати історичні дані про цикл роботи, що дає змогу здійснювати аналітику, прогнозувати збої й оптимізувати витрати енергії. Інтелектуальні алгоритми адаптують режими змішування до мінливих фізико-механічних властивостей компонентів — наприклад, при зміні вологості зернових після дощів. Впровадження автоматизованих систем мінімізує втручання людини, знижує ризик помилок і підвищує пропускну здатність виробництва [6]

Практичні аспекти експлуатації змішувальної установки передбачають регулярне технічне обслуговування, очищення внутрішніх поверхонь і заміну робочих органів, що зазнають найбільшого зносу. При абразивній обробці матеріалів (наприклад, важких мінеральних добавок) кутики стрічок та лопаток можуть піддаватися інтенсивному стиранню, що призводить до погіршення якості змішування. Рекомендується встановлювати захисні вставки або футеровки з зносостійких матеріалів (шарпентина чи пластику) у найбільш навантажених зонах роботи змішувача. Очищення агрегату від залишків суміші має відбуватися регулярно, особливо при переході на інший тип рецептури, щоб уникнути забруднення наступної партії. Для зменшення енергоспоживання застосовують системи рекуперації тепла, що дозволяють використовувати надлишкове тепло від агрегатів у передкондиціонувальних камерах. Сезонні піки у потребі кормів чи добрив вимагають гнучкого регулювання роботи змішувальної лінії, що може потребувати нарощування потужності обладнання

або встановлення резервних змішувачів. Оптимальна експлуатація також включає організацію цілорічного технічного супроводу, навчання персоналу та наявність достатнього запасу критичних запчастин для швидкого усунення аварійних ситуацій [16].

Слід звернути увагу на безпеку роботи змішувальної установки: доступ до робочих органів має бути захищений, а контрольні панелі розташовані таким чином, щоб оператор міг у будь-який момент зупинити процес у разі надзвичайної ситуації. Використовують датчики відкриття люків, які автоматично зупиняють обертання лопатей або стрічок при будь-якій спробі доступу до змішувальної камери. Електричні щити обладнують захисними реле та автоматичними вимикачами, щоб запобігти короткому замиканню й перевантаженню лінії. Персонал повинен проходити інструктаж із техніки безпеки, користуватися засобами індивідуального захисту – рукавицями, окулярами та респіраторами, особливо при роботі з дрібнодисперсними порошками, які можуть спричинити професійні захворювання дихальних шляхів. Надбункерні зони обладнані сітчастими огорожами, щоб уникнути падіння матеріалу та травм оператора. Планові інструктажі з охорони праці та регулярні тренування з евакуації дозволяють персоналу оперативно реагувати на аварійні ситуації й мінімізувати ризики при роботі змішувальної лінії [14].

Кожен агропромисловий комплекс повинен мати систему документації, що включає технологічні карти рецептур, журнали обліку параметрів змішування, акти контролю якості та звіти про технічне обслуговування. Документація дає змогу відстежувати відповідність роботи змішувача встановленим стандартам, аналізувати відхилення та впроваджувати коригувальні заходи. Важливою є інтеграція технологічних процесів змішування з загальною системою управління виробництвом, щоб оптимізувати логістику сировини, розподіл енергоресурсів і планування обсягів випуску продукції. Автоматизовані звіти про споживання сировини й готових сумішей дозволяють своєчасно коригувати графіки поставок і прогнозувати потреби на наступні періоди. В документах зазначають дату, час, обсяги

завантаження, параметри циклу змішування та результати лабораторних тестів, що забезпечує прозорість і відстежуваність усього технологічного ланцюга. Такий підхід сприяє підвищенню якості продукції, зменшенню виробничих витрат і покращенню управління запасами [12].

За відсутності необхідних умов для змішування сипкі матеріали можуть піддаватися додатковому кондиціюванню — наприклад, подачі пари в корпус змішувача для тимчасового збільшення вологості та поліпшення зв'язувальної здатності частинок. Це особливо важливо при виробництві комбікормів із високим умістом крохмалю та білків, які під впливом температури швидко утворюють в'язкі сполуки. Подача пари має відбуватися точково та дозовано, щоб уникнути надмірного нагрівання та денатурації цінних амінокислот і вітамінів. Після кондиціювання суміш може переходити на процес гранулювання, де якість попереднього змішування значно впливає на якість пелет. Також інколи додають не тільки вологу, а й рідкі фази (жири, олії), щоб підвищити енергетичну цінність готового корму та покращити його смакові властивості. Системи кондиціювання інтегрують із управлінням змішувачем, щоб контролювати температуру, тиск та витрату пари в реальному часі. Після випарування надлишкової вологи суміш повертається до оптимальних параметрів вологості для запобігання злежуванню [11].

Таким чином, технологічний процес змішування сипких матеріалів сільськогосподарського призначення є багатоступеневим і вимагає комплексного підходу до підготовки сировини, вибору обладнання, контролю параметрів і експлуатаційного обслуговування. Кожен із описаних етапів — від очищення й подрібнення до автоматизованого моніторингу й технічного обслуговування — впливає на кінцеву якість суміші та її функціональні властивості. Правильне проектування лінії та своєчасне реагування на відхилення дозволяють забезпечити необхідний рівень однорідності, знизити енергозатрати та мінімізувати втрати. Інтеграція з системою управління виробництвом сприяє оперативному коригуванню процесу, своєчасній діагностиці обладнання й підвищенню ефективності всього виробництва.

Застосування сучасних технологій автоматизації та методів контролю гарантує дотримання нормативних вимог і стандартів якості, що є ключовим чинником для успішної роботи агропромислових підприємств. Завдяки цьому вдається досягти високих техніко-економічних показників, що сприяє збільшенню рентабельності та конкурентоспроможності продукції на ринку [6].

2.2 Методика оцінки якості змішування сипких матеріалів сільськогосподарського виробництва.

Технологія оцінки якості змішування сипких матеріалів полягає у визначенні ступеня однорідності суміші за допомогою кількісних і якісних показників. При цьому використовують як класичні статистичні методи, так і сучасні сенсорні та лабораторні методики. Першочергова задача полягає в коректному відборі проб із різних зон робочого об'єму змішувача чи транспортної лінії. Згідно з базовими вимогами, проби відбирають із не менше ніж чотирьох контрольних точок, розташованих у центральній частині та біля стінок апарату, аби врахувати можливі зони «мертвого» матеріалу. Кожну пробу ретельно вагово-фракційно аналізують на вміст основних компонентів (зернові, макуха, мінерали, добавки) і визначають їх відхилення від середнього значення. На основі отриманих результатів розраховують коефіцієнт варіації (CV), який є одним із найпоширеніших індексів однорідності: значення $CV \leq 10\%$ прийнято вважати задовільним для комбікормів і добрив [8]. У випадку перевищення цього порога суміш піддають повторному змішуванню або коригуванню рецептури [3].

Один із класичних методів оцінки якості змішування — застосування індикаторів: радіоактивних, кольорових чи флуоресцентних міток. Найчастіше використовують малоактивні ізотопи або фарби, рівномірно розподілені в одній із фракцій суміші. Після заданого часу роботи змішувача у різних точках відбирають проби й вимірюють концентрацію індикатора (за допомогою сцинтиляційних лічильників, спектрофотометрів чи візуальної оцінки).

Розрахунковий показник – середньоквадратичне відхилення концентрації індикатора в пробах: чим менше відхилення, тим вища однорідність суміші. Методика, запропонована в роботах Бойка Д. І., демонструє достатню простоту й надійність і не залежить від розміру проб [4]. Однак цей підхід потребує дотримання радіаційної безпеки (у разі використання ізотопів) або точного дозування барвників, щоб уникнути впливу на поживні властивості чи реакцію споживачів (тварин) [12].

Для лабораторних досліджень часто застосовують метод «пакетів проб»: у готовій суміші формують певну кількість пакетів із фіксованим об'ємом (або масою) матеріалу в різних зонах змішувача. Далі всі пакети зважують і висипають у загальну купу, ретельно перемішують, після чого вибирають нові проби з об'єднаного об'єму. Різниця між початковою та повторною фракційною структурою вказує на ступінь однорідності. Така методика дозволяє виявити не тільки локальні відхилення, а й загальні тенденції сегрегації в суміші. Згідно з результатами чисельних та експериментальних досліджень, під критерій приймають значення CV для кожного пакета: менші за 12 % – відмінна якість, 12–15 % – задовільна, більше ніж 15 % – низька однорідність [9].

Статистичний підхід до оцінки якості змішування також включає аналіз розподілу розмірів частинок (ситове ситкування) та фракційний склад об'єднаної суміші. Використовуються стандартні набори сит із різними розмірами осередків, через які пропускають кілька проб із однієї партії. За масою залишку на кожному ситі розраховують фракційну структуру – діаграму розподілу частинок. Індекс неоднорідності визначають як відхилення фракційної маси будь-якої розмірної групи від середнього значення по всіх пробах. Показник «однорідність за дисперсністю» доповнює звичайний CV за хімічним складом і допомагає виявляти сегрегацію дрібних і великих частинок. У наукових публікаціях наголошується, що критичним є підтримка фракцій менш ніж 2–3 мм для комбікормів, аби забезпечити рівномірне проходження через прес-гранулятор і уникнути подальшого розшарування [7].

При впровадженні на виробництвах дедалі частіше застосовують сенсорні системи контролю однорідності в реальному часі. Одним із варіантів є використання оптичних сенсорів (спектрофотометрів, фотометрів) у вивантажувальних лініях змішувача чи гранулятора. Такі пристрої аналізують відбите або пропущене світло через шар сипкої суміші, визначаючи колірне та спектральне розмаїття фракцій. На основі цих даних розраховують коефіцієнт неоднорідності у вигляді варіаційного ряду інтенсивності відбитого світла. Методика дозволяє оперативно виявляти зміни складу під час циклу виробництва й своєчасно коригувати швидкість стрічки чи співвідношення компонентів. За даними практичних досліджень, точність оптичного методу оцінки CV становить близько 8–10 % при правильному калібруванні [9]. Проте в умовах високої вологості або запиленості виробничого приміщення сенсори потребують частого очищення та регулювання [14].

Для більш глибокого аналізу застосовуються чисельні методи моделювання процесу змішування (дискретний елементний метод, DEM). Моделюючи рух окремих частинок у змішувачі, можна прогнозувати час досягнення необхідної однорідності та визначити зони потенційної сегрегації. Результати моделювання порівнюють із експериментальними даними, отриманими за допомогою вимірювань CV та фракційного складу, що дозволяє валідувати модель. Використання DEM дає змогу оптимізувати геометрію робочих органів змішувача та режими обертання, щоб мінімізувати час циклу та знизити енергоспоживання. Згідно з сучасними дослідженнями, правильна верифікація чисельної моделі може забезпечити точність прогнозу однорідності до $\pm 5 \%$ [9]. Системний підхід об'єднує лабораторні, промислові та моделювальні дані для комплексної оцінки технологічного процесу [17].

Методика оцінки також враховує властивості компонентів: розмір частинок, форма, вологість і насипна щільність. Наприклад, дорогоцінні компоненти (вітамінно-мінеральні добавки) можуть становити лише 0,5–1 % загальної маси, але їх нерівномірний розподіл суттєво впливає на біодоступність поживних речовин. Установлено, що при різниці щільності

компонентів понад 200 кг/м³ показник CV може зростати на 4–6 %. Тому перед змішуванням проводять попереднє кондиціювання легких фракцій (зволоження до ~ 5 % вологості) або зміну розмірів частинок (через сепарацію чи подрібнення). Для більш гомогенних сумішей дотримуються коефіцієнта заповнення змішувача близько 60 % від об'єму для уникнення надмірного перемішування та зносу устаткування. Ці рекомендації базуються на експериментальних дослідженнях у виробничих умовах та лабораторних випробуваннях [9].

Після проведення лабораторних або сенсорних вимірювань дані аналізують із використанням стандартних статистичних пакетів (SPSS, MATLAB, Python). Розрахунок середнього та стандартного відхилення концентрації кожного компонента здійснюють за формулою:

$$CV = \sigma_{\mu} \times 100\%,$$

де σ — стандартне відхилення, μ — середнє значення концентрації. Додатково розраховують показник «ентропії суміші» (за формулою Шеннона) для оцінки випадковості розподілу частинок. Прикладом є розрахунки, наведені в роботах Рябова Р. М. та Мілька Д. О., де ентропія використовується як альтернативний критерій однорідності при високій дисперсності компонентів [4]. Аналітичні результати візуалізують у вигляді гістограм розподілу концентрацій та графіків «CV – час змішування», щоб визначити оптимальний час досягнення стабільного стану [18].

На промислових підприємствах після основних вимірювань складають звіти, куди входять протоколи пробопідготовки, результати хімічного та фізичного аналізу, розрахунок CV, ентропії та рекомендації щодо коригування технологічних параметрів. У документації обов'язково зазначають дату, час, об'єми проб, використовувані методи аналізу і висновки щодо відповідності стандартам. Регулярне відстеження показників однорідності (не менше ніж раз на зміну) дозволяє запобігти накопичуванню дефектних партій і забезпечити стабільність якості продукції. У звітах відображають також технічні характеристики обладнання (тип змішувача, об'єм, швидкість обертання),

умови зберігання компонентів та можливі відхилення від нормативів. Така комплексна методика документації сприяє ефективному менеджменту виробництва та прозорості в контролі якості [6].

Підсумовуючи, методика оцінки якості змішування сипких матеріалів у сільськогосподарському виробництві охоплює декілька етапів: відбору проб, лабораторного та сенсорного аналізу, статистичних розрахунків і моделювання до оформлення виробничої документації. Поєднання класичних методів (CV, фракційний аналіз, індикаторні методики) з сучасними (сенсорні системи, DEM-моделювання) забезпечує всебічний контроль однорідності. Використання радіоактивних та кольорових індикаторів дозволяє точно оцінювати нерівномірність навіть у малих компонентах, тоді як оптичні сенсори дають змогу контролювати якість у реальному часі. Застосування чисельних моделей дозволяє прогнозувати результати змішування й оптимізувати конструкцію змішувачів ще на стадії проектування. Системний підхід із постійним моніторингом і аналітикою гарантує мінімізацію відхилень від нормативів, економію ресурсів і високу якість кінцевої продукції – комбікормів, добрив чи інших сипких сільськогосподарських сумішей [7].

РОЗДІЛ 3

КОНСТРУКТИВНИЙ РОЗДІЛ

3.1. Огляд існуючих варіантів змішувачів

Огляд існуючих варіантів змішувачів для сипких матеріалів показує, що їхня конструкція дуже варіюється. Це пояснюється різними вимогами до технологічних операцій у промисловості, неоднаковим складом і властивостями сумішей, а також відсутністю єдиних теоретичних методик проектування таких апаратів. Тому більшість конструкцій формується експериментально, на основі практичних досліджень.

За способом роботи змішувачі поділяються на агрегати з безперервним або періодичним циклом, а за мобільністю їх умовно групують на стаціонарні та пересувні машини. Розташування робочих органів може бути горизонтальним, похилим або вертикальним, залежно від просторових умов виробництва та необхідного профілю руху матеріалу. Щодо характеру взаємодії компонентів, застосовують протиточне чи паралельне змішування, коли задають напрямок подачі сировини відповідно один одному або у протилежних напрямках.

Механізм роботи змішувачів ґрунтується на конвективних, дифузійних або комбінованих конвективно-дифузійних процесах, що визначають інтенсивність і швидкість досягнення однорідності. Вплив на сипку суміш може здійснюватися різними способами: за рахунок сили тяжіння (гравітаційні), завдяки обертовим рухам (центробіжні) або за допомогою повітряного потоку (пневматичні). Конструктивно змішувачі бувають із обертовим корпусом або з нерухомим корпусом і рухомим робочим органом, а також представлені варіантами з одним валом чи з декількома робочими механізмами, наприклад, гвинтовими, лопатевими, шнековими тощо.

Класифікаційні ознаки змішувачів охоплюють спосіб встановлення (стаціонарні чи пересувні), режим роботи (безперервний чи періодичний),

швидкість обертання змішувального елемента (низькошвидкісні та високошвидкісні), а також механізм самого процесу змішування (конвекція, дифузія, конвективно-дифузійне поєднання). За методом впливу на матеріал апарати розрізняють на гравітаційні, центробіжні та пневматичні, а за характером руху частинок – на циркуляційні із замкненим контуром потоку чи такі, де переміщення відбувається хаотично. Окремо звертають увагу на конструктивні нюанси: корпус може обертатися разом із робочим органом, або ж корпус залишається нерухомим, а змішувальні деталі рухаються всередині нього; вал може бути розташований вертикально чи горизонтально, залежно від обраного типу агрегату.

Через те, що багато характеристик можуть поєднуватися всередині одного пристрою, один змішувач одночасно потрапляє до кількох груп. Наприклад, мобільний змішувач із горизонтальним обертовим корпусом і конвективно-дифузійним механізмом може належати до категорій пересувних, горизонтальних та комбінованих за принципом дії. Тому класифікація найчастіше базується на виборі тієї ознаки, яка в даному конкретному випадку визначає ключові робочі параметри апарату.

Найбільш розповсюдженими пристроями для змішування сипких матеріалів є барабанні машини. Вони забезпечують високу якість суміші за помірних енерговитрат і достатньої продуктивності. Серед їхніх недоліків — складність автоматизації завантаження компонентів і вивантаження готової продукції, а також обмежена точність дозування інгредієнтів.

Барабанні змішувачі класифікують залежно від форми корпусу: це можуть бути циліндричні, конусні або з корпусом зі зрізаним кутом. За типом робочих елементів їх ділять на моделі з внутрішніми лопатями, шнеками або ж на камерні варіанти, у яких усередині розташовані окремі відсіки для ретельнішого перемішування.

Лопатеві змішувачі відрізняються типом кріплення лопатей, їхньою кількістю, формою та конструкційними особливостями. До недоліків таких

агрегатів належать значні енерговитрати на підніманні і перекиданні маси, а також потенційне подрібнення матеріалу в процесі роботи.

Вібраційні змішувачі призначені переважно для вологих сумішей (наприклад, будівельних розчинів). Їх поділяють на циркуляційні та активаційні. Головними недоліками є ненадійність вібраційних вузлів та складність приводу, який створює вібрацію корпусу.

Шнекові змішувачі зустрічаються в різноманітних виконаннях: одно- або багатошнекові, з різними типами гвинтових елементів, однопотокові та протиточні, з безперервною спіраллю чи зі стрічкою з перервами. До їхніх переваг належать низькі енерговитрати, можливість безперервного процесу й об'єднання завантаження, змішування, подавання, дозування та вивантаження в одному апараті.

Окрім того, існують комбіновані машини, які поєднують у собі особливості барабанних, лопатевих та шнекових змішувачів. Прикладами є барабанно-шнекові або барабанно-лопатеві установки й інші гібридні рішення.

Основні класи та типи змішувачів наведені на рисунку 2.1.



Рис. 3.1. Класифікація змішувачів сипких матеріалів.

Найбільш поширені змішувачі розрізняються за своєю конфігурацією, технічними параметрами та принципом дії, про що детально йдеться в численних дослідженнях.

Ефективність роботи будь-якого змішувача значною мірою визначається конструктивними особливостями його робочого органу. Дослідження показали, що за однакових витрат енергії кращі показники гомогенізації досягаються у змішувачах, у яких робочий орган має більший крок гвинтової лінії. Зі зростанням кута підйому гвинта інтенсивність коливань швидкостей окремих фрагментів матеріалу зростає, що підвищує якість змішування при високій продуктивності обладнання.

Оптимальний рівень заповнення камери змішувача також критично важливий. Рекомендовані коефіцієнти заповнення становлять: для барабанних машин – приблизно від 0,30 до 0,35; для горизонтальних одновальних чи двохвальних – у межах 0,40–0,60; для вертикальних шнекових установок – від 0,80 до 0,90 [10].

За величиною окружної швидкості обертання робочих елементів змішувачі сипких матеріалів поділяють на кілька типів. Зокрема, змішувачі з періодичною або безперервною роботою стрічки й планетарні шнекові машини відносять до зсувного класу, оскільки їхня окружна швидкість близько 1 м/с. До конвективних агрегатів належать ті, чий робочий орган обертається зі швидкістю від 2 до 6 м/с (наприклад, турбулентні або лопаткові змішувачі). Інтенсивні лопатеві машини працюють на ще вищих оборотах – від 15 до 30 м/с, що забезпечує надзвичайну швидкість і якість перемішування.

У сільськогосподарських технологіях особливу увагу приділяють поєднанню кількох операцій у єдиному агрегаті. До прикладу, для приготування запарених кормів застосовують змішувачі-запарники серій С2, С7, С12, за допомогою яких одночасно відбувається нагрів та перемішування сировини. Аналогічно, процес подрібнення і змішування соковитих кормів реалізують у подрібнювачах-змішувачах типу ИСК–3. Коли ж мова йде про сипкі матеріали, часто використовують змішувач-завантажувач СЗУ–20, що дає

змогу поєднати три етапи: дозування та перемішування до трьох компонентів, а відразу після цього – автоматизоване завантаження готової суміші в транспортні засоби або розкидувачі без участі робітника. Завдяки такій конструкції продуктивність СЗУ–20 перевищує 20 тонн на годину.

Неперервні змішувачі за принципом руху матеріалу поділяють на кілька типових груп. Існують установки, де компоненти рухаються в напрямку осі без відносного зсуву між окремими частинками – це переважно вертикальні машини з радіальними мішалками. Інший різновид – горизонтальні лопатеві системи, у яких завдяки різній геометрії лопатевого пакета створюються протиточні потоки і відбувається відносний поздовжній зсув матеріалу. Крім того, є змішувачі, у яких сипка маса пересувається хаотично в об'ємі камери. Такі неперервні установки завжди працюють у парі з дозувальними апаратами, що постачають компоненти у встановлених кількостях. Якість отриманої суміші залежить від амплітуди коливань подачі матеріалів із цих дозаторів і від здатності самого змішувача «вирівнювати» нерівномірності, що виникають у процесі дозування.

3.2. Перспективні конструкції змішувачів сипких матеріалів

Для перемішування багатокомпонентних сипучих сільськогосподарських матеріалів із невисокими вимогами до однорідності запропоновано компактний гвинтовий змішувач (див. рис. 3.2). Його конструкція базується на рамі, у нижній частині якої розміщено електродвигун із приводним механізмом (наприклад, зірочкою та ланцюгом). На цій же рамі нерухомо закріплено циліндричний корпус, кут нахилу якого щодо горизонту можна змінювати за допомогою спеціальних регулювальних пристроїв (на схемі не показані).

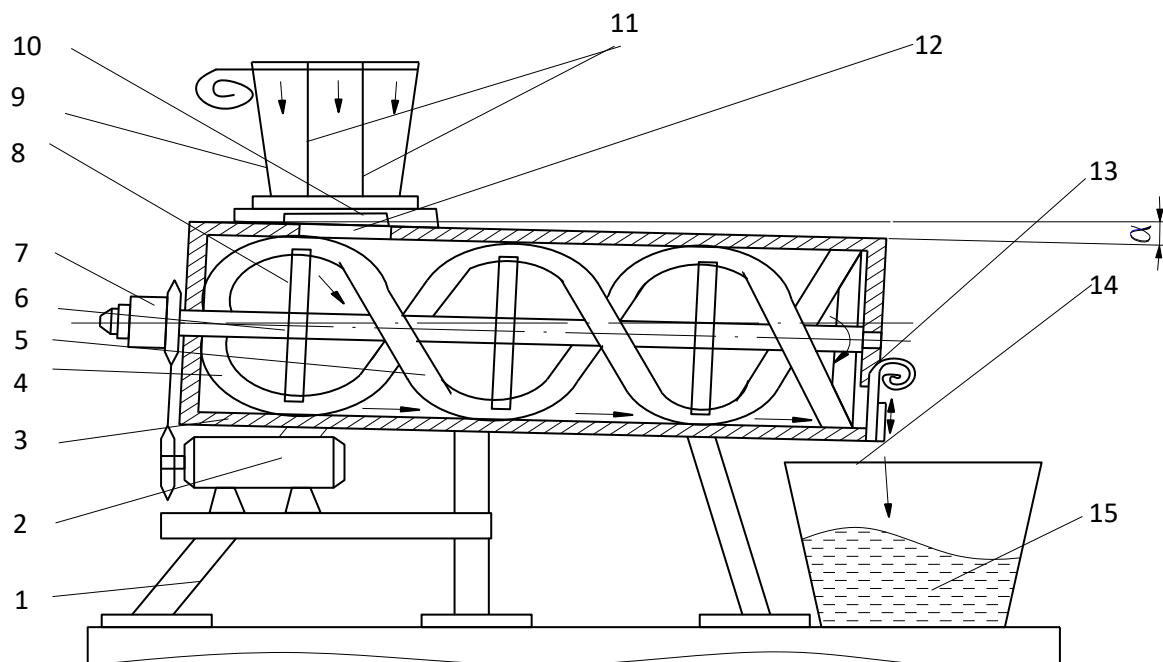


Рис. 3.2. Гвинтовий змішувач.

Всередині нерухомого циліндричного корпусу 3 розташовано двоспіральний гвинтовий змішувач, що складається з двох консольних спіралей 4 і 5, закріплених на валу 6. Одна зі спіралей 4 відрізняється більшим кроком і шириною, завдяки чому саме вона визначає осьовий напрямок руху сипкого матеріалу в змішувальній зоні. Обидві спіральні лопаті 4 і 5 жорстко приварені до вала 6 за допомогою ребер 8. На лівому кінці вала встановлено приводну зірочку 7 із запобіжною муфтою, яка через ланцюгову передачу з'єднана із зірочкою електродвигуна.

У верхній лівій частині корпусу розміщено бункер 9 із заслінкою 10 та перегородками 11, причому число перегородок відповідає кількості компонентів, що завантажуються в змішувач. Через улаштоване під бункером вікно 12 сипкі компоненти потрапляють у робочу зону гвинтового механізму. Для вивантаження готової суміші в корпусі передбачене окреме вікно, яке закривається заслінкою 13. Під цим вихідним отвором розташовано ємність 14, у яку подається вже перемішаний матеріал 15.

Корпусний кожух, що захищає ланцюговий привід, на схемі не наведений.

Технологія приготування суміші починається з підготовки обладнання. Компоненти засипають у бункер 9, розподіляючи їх у відповідні відсіки за допомогою перегородок 11. Кількість і розташування перегородок відповідають кількості інгредієнтів, а їх положення регулює об'єм кожного відсіку. Після завантаження вмикають привід, і вал 6 починає обертатися; у цей момент відкривається заслінка 11, що дає змогу дозовано подати матеріали до змішувальної камери. Завдяки двоспіральним лопатям 4 і 5 відбувається перемішування суміші. Інтенсивність змішування залежить від геометрії спіралей 4 і 5: ширина та крок спіралі 4 розроблені більшими, ніж у спіралі 5, що враховує кінематику потоку матеріалу та трибологічні властивості складових. Саме спіраль 4 визначає напрям осьового руху сипкої маси, тоді як нахил корпусу 3 щодо горизонту регулює інтенсивність процесу. Готова суміш 15 через вікно, яке закривається заслінкою 13, вивантажується спіраллю 4 у ємкість 14. Спіраль 5, навпаки, протидіє поздовжньому руху матеріалу, сприяючи його ретельному перемішуванню, а спіраль 4 поєднує функції змішування, осьового переміщення та вивантаження.

Гвинтовий змішувач вирізняється своєю простою конструкцією, високою продуктивністю та відмінною якістю гомогенізації. Великий асортимент сипких компонентів із різними властивостями та жорсткі вимоги до технології й якості виготовлення таких сумішей призвели до розробки широкого спектру обладнання для їх перемішування в аграрній галузі. У сучасних умовах одним із ключових факторів при виборі змішувача є його енергетична ефективність. Тому наукове обґрунтування витрат енергії під час роботи такого обладнання має вирішальне значення для конкурентоспроможності продукції сучасного машинобудування.

На рисунку 3.3 зображено конструкцію стрічково-лопатевого змішувача з механізмом перекидання лопатей. У завантажувальному рукаві 1 розташована спіраль 2, змонтована на валу 3; на цьому ж валу встановлена крильчатка 5. Завантажувальний рукав зафіксований хомутом до корпусу 6. У середині корпусу 6 розміщений патрубок прямокутного перерізу, який через хомут

приєднано до розвантажувального рукава 7. У розвантажувальному рукаві на тому самому валу 3 закріплено спіральну стрічку 8. На середній частині вала, під переходом трубопроводу, нерухомо закріплено зірочку 10, що через ланцюгову передачу взаємодіє із зірочкою 11 електродвигуна 12. Зверху над завантажувальним рукавом 1 розташовано бункер 4, призначений для подавання сипких матеріалів у змішувач.

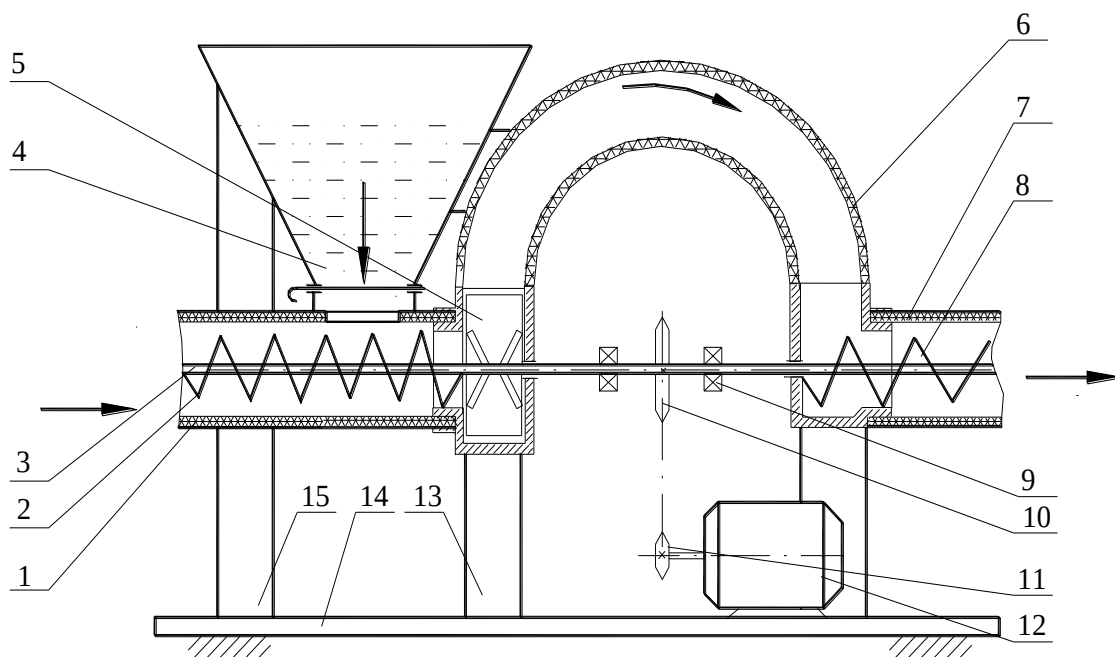


Рис. 3.3. Конструктивне зображення стрічково-лопатевого змішувача.

Технологія подачі й перемішування матеріалів полягає в надходженні сипучої суміші з бункера 4 у гнучкий рукав 1. Бункер закріплено на плиті 14 за допомогою стійок 13 і 15 та інших фіксувальних вузлів.

Коли привод запускається, вал 3 із гвинтовими спіралями 2 і 8 починає обертатися. Сипкі матеріали з бункера 4 за допомогою завантажувальної гвинтової стрічки надходять до зони дії крильчатки 5, де відбувається інтенсивне перемішування. Далі суміш через корпус 6 рухається до вихідного отвору, де вона додатково обробляється розвантажувальною гвинтовою спіраллю 8 перед потраплянням у призначені для цього ємності.

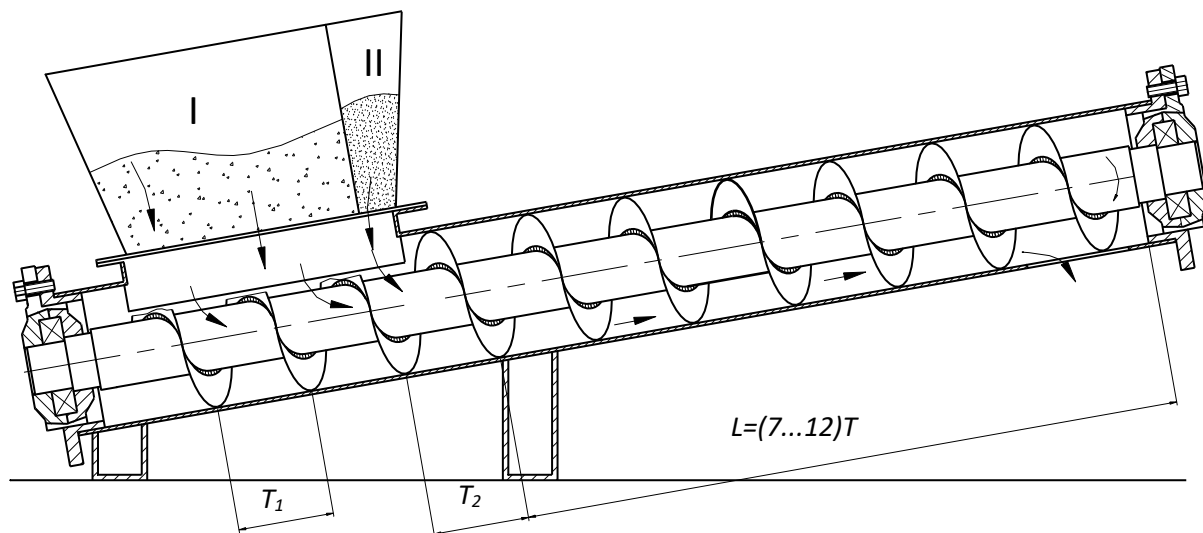


Рис. 3.4. Принципова схема будови гвинтово-стрічкового змішувача

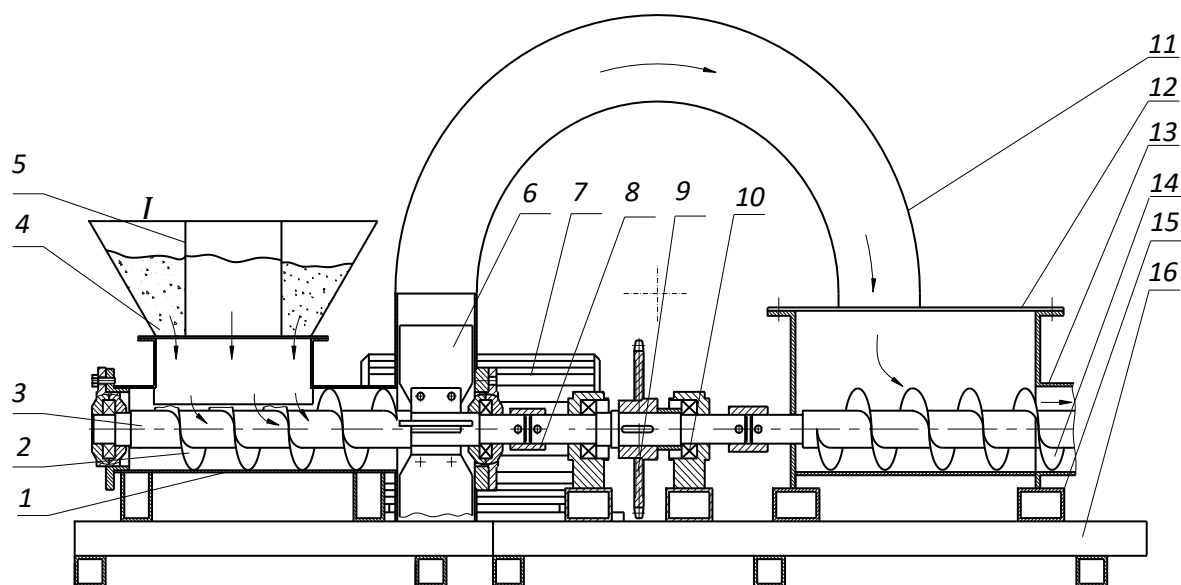


Рис. 3.5. Компонувальна схема центрально-привідного гвинтово-стрічково-лопатевого транспортер-змішувача для сипких матеріалів.

З метою вивчення процесу змішування було сконструйовано гвинтовий стрічковий змішувач (див. рис. 3.4). Компоновка та конструкція гвинтово-стрічково-лопатевого змішувача з механізмом перекидання лопатей для приготування комбікормів подані на рис. 3.5.

Гвинтовий змішувач складається з корпусу 1, всередині якого на підшипниках обертається вал 3 із прикріпленою до нього через ребра жорсткості гвинтовою спіраллю 2. На кінці вала встановлено крильчатку 6

(подібну до вентилятора). У верхній частині корпусу змонтовано завантажувальний бункер 4, розділений шиберами та заслінками 5 на потрібну кількість відсіків відповідно до числа компонентів сипкої суміші. Біля крильчатки виконано прямокутний отвір у корпусі 1, до якого через хомут приєднано трапоподібний трубопровід 11 з прямокутним перерізом. Цей трубопровід за допомогою стяжної планки з'єднано з розвантажувальним бункером 12. Усередині розвантажувального бункера на валу зафіксована спіраль 14. У середній частині вала, під трапоподібним трубопроводом, нерухомо закріплено зірочку 9, що через ланцюгову передачу зв'язана з керуючою зірочкою електродвигуна 7. Для спрощення монтажу привідної системи центральний вал розділено на три окремі секції, які з'єднуються муфтами 8; кожна секція встановлена на власних підшипниках кочення 10.

Сипучі матеріали надходять з бункера 4 безпосередньо у корпус гвинтового змішувача 1, де й відбувається їх транспортування та обробка. Сам корпус, електродвигун, опори центральної секції та розвантажувальний бункер із приєднаним рукавом закріплено на опорній плиті 16 за допомогою стійок 15.

Після запуску електродвигуна 7 приводного механізму вал 3 починає обертатися разом із гвинтовими стрічками 2 і 14. Завантаження сипких компонентів із бункера 4 відбувається у заданих пропорціях, які регулюють відкриванням шиберів у відповідних секціях бункера. Перший етап — подача матеріалу на стрічкову спіраль 2, що транспортує його до зони дії крильчатки 6. Тут суміш інтенсивно перемішується й далі рушить по трапоподібному трубопроводу через розвантажувальний бункер у вихідну зону. Наприкінці цього маршруту шнек 14 забезпечує додаткове перемішування суміші перед її поступовим вивантаженням у підготовлені ємності.

3.3 Конструктивні особливості проєктованого змішувача

Для перемішування багатокомпонентних сипких сільськогосподарських матеріалів із невисокими вимогами до однорідності запропоновано гвинтовий змішувач (див. рис. 3.6).

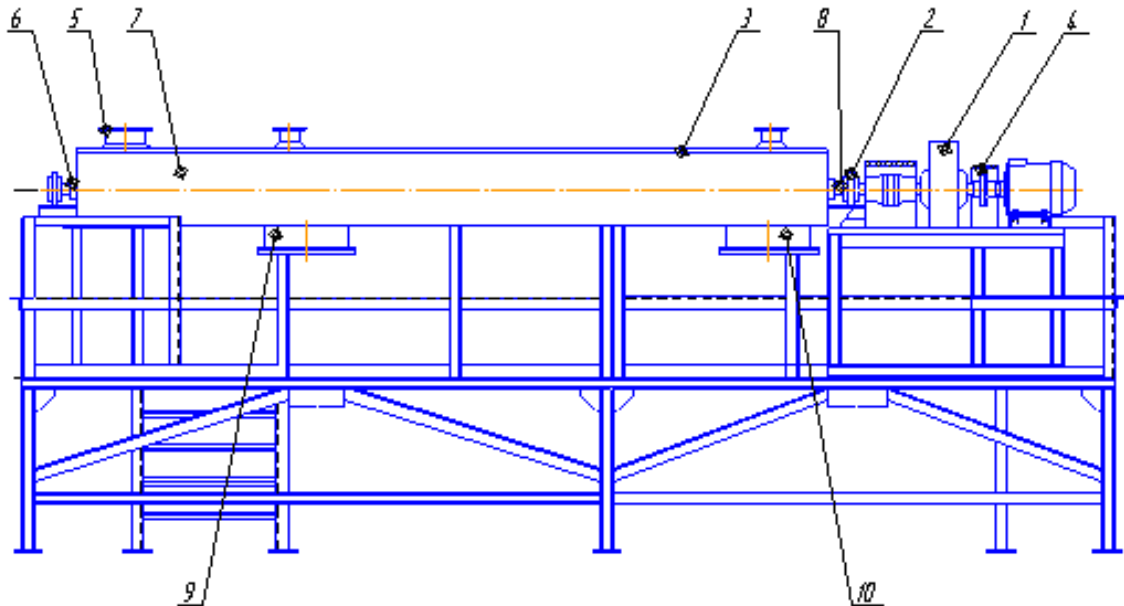


Рис. 3.6. Конструктивна схема змішувача.

Гвинтовий змішувач складається з нерухомого жолоба 7 з напівциліндричним днищем, у якому встановлений вал 8 із закріпленим на ньому гвинтом. Вал з'єднано з приводом 1 через муфти 4. Він змонтований у кінцевих підшипниках 2 і 6, які підвішені до поперечних планок жолоба. В одній з кінцевих опор гвинта розміщено упорний підшипник, що сприймає поздовжні зусилля в гвинті. Жолоб накрито кришкою 3; у деяких варіантах передбачений пісковий затвор. Насипні матеріали завантажуються через люк у кришці 5 і перемішуються гвинтом, рухаючись уздовж жолоба до розвантажувальних воронки — проміжної 9 або кінцевої 10, які перекриті шиберними затворами. Жолоб складається з окремих секцій довжиною 2 або 4 м, виготовлених із листової сталі товщиною 3–6 мм.

Гвинтові вали виготовляють з одно-, дво- або тризахідними спіралями, які можуть мати праве чи ліве навивання. Багатозахідні конструкції забезпечують вищу пропускну здатність у порівнянні з однозахідними гвинтами.

Напрямок переміщення матеріалу в змішувачі визначається як напрямком обертання вала, так і напрямом витків його спіралі.

Сам гвинт складається з окремих секцій довжиною від 1,5 до 3 м, які встановлюються в упорному підшипнику з одного торця (а у реверсивних змішувачах – з обох). Місця стику суміжних секцій виконані так, щоб їхні нерівності не співпадали. Діаметр робочого гвинта складає 500 мм. Привід базується на редукторній схемі та включає електродвигун, редуктор і муфти.

Завантаження сипких матеріалів здійснюється через люк у крищі жолоба. Вивантаження може відбуватися в будь-якій точці вздовж змішувача завдяки встановленому шиберному затвору.

Редуктор з'єднано з валом гвинта зрівнювальною муфтою, а вал електродвигуна з редуктором – пружною муфтою. Жолоб виготовлено зі сталевих листів товщиною 3–6 мм.

Переваги такого гвинтового змішувача: проста й надійна конструкція; легкість технічного обслуговування; герметичність, оскільки матеріал обробляється у закритому жолобі; компактні габарити; а також можливість здійснювати вивантаження на будь-якій ділянці конвеєрного шляху.

До недоліків належать підвищені енергозатрати через тертя матеріалу об стінки жолоба й лопаті гвинта, а також порівняно невисока продуктивність.

3.4 Розрахунок основних елементів змішувача

Визначення ключових параметрів. Враховуємо густину вантажу. $\gamma_v = 6$ кН/м³, Оскільки матеріал має низьку вагу, беремо за основу коефіцієнт заповнення жолоба $\psi = 0.4$ [Т. Д.А], крок гвинта $S = 0.8 \cdot D$. Визначаємо розмір зовнішнього діаметра $D = 0.5$ м, тоді $S = 0.8 \cdot 0.5 = 0.4$ м величини D і S відповідають ДСТУ.

Визначаємо максимально допустиму частоту обертання гвинта (об/хв) n_{max} , знаючи $A = 65$:

$$n_{\max} = \frac{A}{\sqrt{D}} \quad (3.1)$$

$$n_{\max} = \frac{65}{\sqrt{0.5}} = 92 \quad (\text{хв}^{-1})$$

Беремо $n_{\max}=90 \text{ хв}^{-1}$ допустиме за ДСТУ.

Для розрахунку продуктивності конвеєра використовуємо формулу, скориставшись $C=0.8$

$$Q_{\epsilon} = 47 \cdot D^2 \cdot S \cdot n_r \cdot \psi \cdot \gamma_{\epsilon} \cdot C \quad (3.2)$$

$$Q_{\epsilon} = 47 \cdot 0,5^2 \cdot 0,4 \cdot 90 \cdot 0,4 \cdot 6 \cdot 0,8 = 812 \quad (\text{кН/год})$$

що відповідає заданій продуктивності $Q_{\epsilon} = 800$

Розраховуємо швидкість переміщення вантажу за наступною формулою:

$$g = \frac{S \cdot n_r}{60} \quad (3.3)$$

$$g = \frac{0,4 \cdot 90}{60} = 0,6 \quad (\text{м/сек.})$$

Лінійне навантаження від матеріалу розраховуємо за формулою:

$$q_{\epsilon} = \frac{Q_{\epsilon}}{3,6 \cdot g} \quad (3.4)$$

$$q_{\epsilon} = \frac{800}{3,6 \cdot 0,6} = 370 \quad (\text{Н/м})$$

Обчислення потужності двигуна. Потужність, що передається на вал гвинта, розраховуємо за формулою:

$$N_o = \frac{\varpi \cdot g}{1020} \quad (3.5)$$

$$N_o = \frac{1,2 \cdot 0,6}{1020} = 7 \quad (\text{кВт})$$

де $\varpi=1.2$

Обираємо конструкцію приводу конвеєра, що складатиметься з електродвигуна та редуктора.

ККД редуктора дорівнює $\eta_p=0.96$. Враховуючи ККД, муфт, що з'єднують редуктор з двигуном, $\eta_m=0.99$ 4 ККД пари конічних зубчастих коліс $\eta_z=0.98$, визначаємо загальний ККД привода:

$$\eta = \eta_p \cdot \eta_m \cdot \eta_z \quad (3.6)$$

$$\eta = 0,96 \cdot 0,99 \cdot 0,98 = 0,93$$

Для розрахунку номінальної потужності двигуна приводу конвеєра застосовують таку формулу:

$$N = \frac{N_o}{\eta} \quad (3.7)$$

$$N \frac{7}{0.93} = 7.5 \quad (\text{кВт})$$

Вибираємо електродвигун наступного типу АО2-5206 потужністю $N = 7.5$ кВт, $n = 965$ хв⁻¹

Передавальне число:

$$U_n = \frac{n}{n_g} \quad (3.8)$$

$$U_n = \frac{965}{70} = 13,78$$

Обираємо циліндричний редуктор ЦДН-40 з сумарною міжцентровою відстанню $A = 400$ мм та передаточним відношенням $U = 36$. Обчислимо крутний момент, переданий електродвигуном на вал гвинта, за відповідною формулою:

$$M_o = 9750 \cdot \frac{N_o}{n_o} \quad (3.9)$$

$$M_o = 9750 \cdot \frac{7}{70} = 975 \quad (\text{Нм})$$

Лінійну силу, що діє на гвинт, розраховуємо за такою формулою:

$$P = \frac{M_o}{r} \quad (3.10)$$

Розраховуємо показник r за такою формулою:

$$r = 0.8 \cdot \frac{D}{2} \quad (3.11)$$

$$r = 0.8 \cdot \frac{0.5}{2} = 0.2 \text{ (м)}$$

Тоді поздовжня сила буде рівна:

$$P = \frac{975}{0,2} = 4875 \text{ (Н)}$$

Висновки до третього розділу

У цьому розділі представлені стандартні конструкції змішувачів із описом їхніх принципів дії, наведено креслення модернізованого гвинтового змішувача та виконані базові розрахунки для нього. Також розглянуто технологію змішування сільськогосподарської продукції та методику оцінювання якості отриманої суміші.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було досліджено існуючі технологічні процеси виробництва комбікормів, визначено основні недоліки традиційних змішувальних апаратів та розроблено сучасну конструкцію гвинтового змішувача з урахуванням потреб вітчизняного кормовиробництва. Проаналізовано різні типи змішувачів (барабанні, лопатеві, шнекові), їхні принципи дії та технічні характеристики, що дозволило виокремити найбільш критичні показники ефективності: однорідність суміші за мінімальних енерговитрат, продуктивність та зручність обслуговування. На основі цих висновків сформульовано технічні вимоги до нового змішувача, зокрема стосовно геометрії спіралей, кутів нахилу, матеріалів захисного футерування та механізмів завантаження й розвантаження.

Розроблений гвинтовий змішувач забезпечує збільшення продуктивності лінії за рахунок оптимізації кроку спіралей та кута їхнього нахилу. Запропонований змішувач споживає на 10–15 % менше електроенергії порівняно з типовими шнековими аналогами аналогічної продуктивності. Це досягнуто завдяки зменшенню тертя матеріалу об стінки жолоба та оптимізації геометрії робочих органів: збільшений кут підйому спіралі дозволяє знижувати осьове зусилля без зниження інтенсивності перемішування.

Виконане удосконалення технологічної лінії виробництва комбікормів за допомогою розробки гвинтового змішувача дозволяє підвищити загальну продуктивність підприємства, знизити енергоспоживання та гарантувати стабільну якість готової продукції. Запропоновані технічні рішення сприяють скороченню витрат на обслуговування та ремонт устаткування завдяки застосуванню зносостійких матеріалів і простій конструкції. Рекомендовано впровадити розроблений змішувач у діючих цехах комбікормового виробництва для удосконалення технології та підвищення конкурентоспроможності продукції на ринку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дудка В. М. Змішувальні машини та апарати в сільському господарстві: монографія. Харків: Крок, 2017. 212 с.
2. Зайцев Л. В. Проектування і розрахунок гвинтових конвеєрів: навч. посібник. Львів: Сполом, 2019. 192 с.
3. Іванченко С. О. Технологічні основи виробництва комбікормів: підручник. Київ: Либідь, 2020. 304 с.
4. Корнієнко П. Д. Змішувачі сипких матеріалів: практичний довідник. Полтава: Полтехпроект, 2015. 224 с.
5. Луцик А. Р. Енергетичні аспекти роботи змішувальних апаратів: монографія. Одеса: ОНАХТ, 2021. 168 с.
6. Мельник Є. І. Машини для виробництва комбікормів: навч. посібник. Херсон: Друкар, 2019. 256 с.
7. Назаренко І. М., Петриченко В. М. Вдосконалення конструкцій шнекових змішувачів: стаття. Журнал аграрного машинобудування, 2020, № 2, с. 45–59.
8. Олійник В. П. Конструкція і експлуатація барабанних змішувачів: підручник. Львів: Світ, 2017. 304 с.
9. Петренко Ю. О. Методи оцінки однорідності сипких сумішей: монографія. Запоріжжя: ТПУ, 2018. 180 с.
10. 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.
11. Риженко С. М. Модернізація ліній комбікормового виробництва: дис. канд. техн. наук. Київ: НАУ, 2021. 220 с.
12. Савченко А. Л. Автоматизація процесів змішування у виробництві комбікормів: практичний довідник. Дніпро: Промінь, 2020. 192 с.
13. Сердюк В. Т. Розрахунок та оптимізація конвеєрних ліній у сільському господарстві: навч. посібник. Черкаси: Брама, 2019. 248 с.

14. Тищенко П. Ю. Металоємність і довговічність змішувальних апаратів: монографія. Харків: Машинобудівельник, 2021. 160 с.
15. Федоренко В. С. Дослідження процесів пневматичного транспортування в лініях комбікормового виробництва: дис. канд. техн. наук. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2018. 198 с.
16. Шевченко Ю. О. Технічне обслуговування змішувачів у кормовому господарстві: навч. посібник. Київ: Академія, 2017. 156 с.
17. Ярмолюк Г. М. Матеріалознавство для змішувального обладнання: монографія. Одеса: «Оморока», 2020. 184 с.
18. Peterson R., Harrell W. Screw Conveyors: Design, Construction and Operation. New York: Wiley, 2015. 384 p.
19. Smith J. A., Brown L. Fundamentals of Animal Feed Mixing Technology. London: Elsevier, 2018. 412 p.
20. Thomas D. E. Screw Conveyor Engineering Handbook. Chicago: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2016. 280 p.
21. White P. O. Feed Production Machinery: Theory and Practice. Dordrecht: Springer, 2017. 329 p.
22. Yakovlev V., Petrov D. Design and Optimization of Industrial Mixers. Berlin: Springer, 2019. 256 p.
23. Anderson K., Johnson T. Principles of Bulk Material Handling. New York: McGraw-Hill, 2017. 448 p.
24. Carter L., Lee H. Advances in Feed Processing Equipment. Amsterdam: Elsevier, 2020. 312 p.
25. Gonzalez F., Martinez R. Energy Efficiency in Agricultural Machinery. Madrid: Springer, 2018. 210 p.
26. Lee S., Chang M. Modern Technologies in Feed Manufacturing. Singapore: World Scientific, 2021. 298 p.