

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

рівня вищої освіти «Магістр» на тему:

**Обґрунтування конструкційно-технологічних
параметрів дозатора комбікорму**

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

за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

_____ Бурдила Владислав Вікторович

Керівник: _____ Івлєв Віталій Володимирович

Рецензент: _____ Леперда Володимир Юрійович

Дніпро 2025

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем
Рівень вищої освіти: «Магістр»
Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

ДОЦЕНТ

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«24» жовтня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Бурдилі Владиславу Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів дозатора комбікорму

керівник роботи: Івлєв Віталій Володимирович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від
« 24 » жовтня 2025 року № 3182

2. Строк подання студентом роботи 12.12.2025 р.

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

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз стану питання. 2. Визначення параметрів і режимів роботи шнекового дозатора сипких матеріалів. 3. Експериментальні дослідження процесу дозування комбікормів. 4. Охорона праці. 5. Техніко-економічна оцінка дозатора. Загальні висновки. Бібліографічний список

5. Перелік демонстраційного матеріалу

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-5	Івлєв В.В., доцент		
Нормоконтроль	Івлєв В.В., доцент		

7. Дата видачі завдання: 26.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент

_____ **Бурдила В.В.**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ **Івлєв В.В.**
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Бурдила В.В. Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів дозатора комбікорму /Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2025.

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена обґрунтуванню конструкційно-технологічних параметрів дозатора комбікорму для ліній приготування та роздавання кормів у тваринництві. Мета роботи - підвищити точність дозування та стабільність подачі комбікормових сумішей за одночасного зниження питомих енерговитрат і забезпечення надійної роботи в умовах змінної сипучості та вологості матеріалу. Об'єкт дослідження - процес дозування сипких комбікормів; предмет дослідження - параметри і режими роботи дозувального вузла (тип і геометрія робочого органа, кут і величина відкриття заслінки, швидкість обертання/лінійна швидкість подачі, зазор у зоні вивантаження, алгоритм керування).

Методика базується на огляді сучасних конструкцій дозаторів (шнекових, стрічкових, шлюзових, вагових), побудові математичної моделі масової витрати як функції конструктивних і режимних змінних, САД/САЕ-опрацюванні вузлів, плануванні експерименту на лабораторному стенді, регресійному аналізі та багатокритеріальній оптимізації (точність, рівномірність подачі, енерговитрати, зносостійкість).

Наукова новизна полягає у формуванні узагальненої критеріальної моделі точності дозування з урахуванням набрякання та злежування сумішей і запропонованні адаптивного керування подачею за сигналами тензометричного/вагового модуля. Практичне значення - визначено рекомендовані діапазони раціональних параметрів робочих органів та режимів роботи, розроблено технічні вимоги до вузла дозатора і алгоритм калібрування під конкретні ре-

цептури; надано інженерні розрахункові залежності для проектування та налаштування дозаторів у складі існуючих ліній. Результати можуть бути використані в агропромислових підприємствах і навчальному процесі для підвищення ефективності механізованих систем годівлі.

Ключові слова: дозатор комбікорму, шнековий подавач, масова витрата, точність дозування, рівномірність подачі, сипкі матеріали, оптимізація, енергоефективність, адаптивне керування, калібрування.

ЗМІСТ

Вступ	8
1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ	12
1.1 Постановка задачі	12
1.2 Класифікація дозаторів сипких компонентів	13
1.3 Аналіз конструкцій шнекових дозаторів сипучих компонентів	17
1.4 Висновки за розділом	26
2 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ І РЕЖИМІВ РОБОТИ ШНЕКОВОГО ДОЗАТОРА СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ	27
2.1 Опис схеми та алгоритму дозування	27
2.2 Опис процесу дозування	31
2.3 Визначення маси сипкого компонента, що перебуває у вільному падінні	39
2.4 Висновки за розділом	46
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДОЗУВАННЯ КОМБІКОРМІВ	47
3.1 Програма експериментальних досліджень	47
3.2 Лабораторна установка	47
3.3 Методика визначення похибки дозування пристрою	49
3.4 Результати досліджень робочого процесу дозатора	50
3.5 Висновки з розділу	55
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	57
4.1 Загальні вимоги охорони праці при роботі з дозатором комбікормів	57
4.2 Оцінка небезпечних факторів з точки зору охорони праці при експлуатації дозатора	58

4.3	Порядок дій під ракетного обстрілу	59
4.4	Висновки з розділу	60
5	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ДОЗАТОРА	61
5.1	Вихідні дані	61
5.2	Розрахунок показників економічної ефективності	61
5.3	Висновки з розділу	63
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	64
	БІБЛІОГРАФІЯ	66
	ДОДАТКИ	69

ВСТУП

Ефективність сучасних тваринницьких підприємств у значній мірі визначається якістю та стабільністю годівлі. Комбікорми становлять основну частку витрат на виробництво продукції тваринництва, а точність їх дозування безпосередньо впливає на продуктивність, конверсію корму, здоров'я поголів'я та економіку господарства. На практиці навіть невеликі систематичні помилки або нерівномірність подачі призводять до перевитрат інгредієнтів, коливань у поживному складі раціонів, підвищення навантаження на обладнання та персонал. В умовах зростання цін на сировину, енергоресурси та вимог до біобезпеки аграрним підприємствам потрібні дозувальні системи, що забезпечують сталу, відтворювану подачу сумішей за мінімальних енерговитрат і з урахуванням реальної мінливості властивостей матеріалу.

Актуальність теми зумовлена низкою технологічних і організаційних викликів:

Мінливість реологічних властивостей сипких сумішей (вологість, гранулометричність, вміст жирів/меляс, наявність дрібної фракції), що змінює сипучість, кут природного укосу та масову витрату під час дозування.

Схильність до сегрегації, злежування, утворення «склепінь» і «колодязів» у бункерах, що викликає періодичність подачі та квазістрибкоподібні коливання витрати.

Неузгодженість між об'ємними та масовими методами дозування: універсальні об'ємні схеми зручні, але чутливі до зміни насипної щільності; вагові - точні, проте дорожчі та вимогливіші до умов експлуатації.

Підвищені вимоги до енергоефективності й надійності, особливо для безперервних ліній приготування та роздавання кормів, де прості критичні.

Санітарно-гігієнічні та пилогазові фактори, що вимагають раціональних швидкостей руху матеріалу, герметизації вузлів та зниження зносу.

Сучасні тенденції (автоматизація, інтеграція з ваговими/тензометричними модулями, цифрове калібрування під рецептури, предиктивне керування) підштовхують до перегляду традиційних підходів і науково обґрунтованого підбору конструкційно-технологічних параметрів дозаторів: тип і геометрія робочого органа (шнек, стрічка, шлюзовий живильник), крок і діаметр, зазори в зоні вивантаження, профіль та кут заслінок, параметри аерації/вібрації, швидкісні режими, алгоритми керування та калібрування. Саме оптимальне поєднання цих параметрів дозволяє зменшити похибку дозування, згладити пульсації потоку, знизити питомі енерговитрати і підвищити ресурс вузлів.

Отже, наукове завдання цієї роботи полягає у встановленні зв'язків між конструктивними та режимними змінними дозатора комбікорму і ключовими критеріями якості процесу (точність, рівномірність, енергоємність, надійність), а також у формуванні методики їхнього раціонального добору для різних типів кормових сумішей.

Мета роботи - обґрунтувати конструкційно-технологічні параметри дозатора комбікорму, які забезпечують високу точність і рівномірність подачі за мінімальних питомих енерговитрат і стабільної роботи в умовах варіативних властивостей матеріалу.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати існуючі конструкції та принципи роботи дозаторів сипких кормів (шнекові, стрічкові, шлюзові, вагові; комбіновані схеми).
2. Визначити номенклатуру експлуатаційно значущих властивостей сумішей (насіпна щільність, кут укусу, коефіцієнт тертя, вологість, гранулометрія) та їхній вплив на масову витрату.
3. Розробити математичну модель масової витрати як функції геометричних параметрів, швидкісних режимів та стану матеріалу; сформулювати критерії оптимізації (точність, рівномірність, енергоефективність, стійкість до

злежування).

4. Спроекувати та дослідити (CAD/CAE) вузли дозатора з урахуванням зносостійкості, герметизації та технологічності виготовлення.

5. Створити експериментальну установку/стенд і програму випробувань із плануванням експерименту; виконати калібрування та регресійний аналіз.

6. Обґрунтувати алгоритми керування (у т.ч. зворотний зв'язок від вагового модуля) і процедури адаптації під конкретні рецептури.

7. Сформувати рекомендації щодо вибору раціональних параметрів і режимів для різних умов експлуатації.

Об'єкт дослідження - процес дозування сипких комбікормових сумішей у механізованих лініях приготування та роздавання кормів.

Предмет дослідження - конструкційно-технологічні параметри дозатора та їхній вплив на точність і рівномірність подачі, енерговитрати та надійність.

Методи дослідження: аналітичні (теорія сипких середовищ, гідродинамічні й трибологічні підходи до взаємодії «матеріал-органи подачі»), математичне моделювання та оптимізація, CAD/CAE-аналіз вузлів, планування експерименту та багатофакторна регресія, тензометричні/вагові вимірювання, статистична обробка даних.

Таким чином, тема магістерської роботи є важливою та своєчасною для агропромислового комплексу, поєднує теоретичні й прикладні аспекти та спрямована на розв'язання конкретних інженерних завдань підвищення ефективності механізованих систем годівлі.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ

1.1 Постановка задачі

Виробництво комбікормів для сільськогосподарських тварин є одним із ключових чинників розвитку тваринництва та всього агропромислового комплексу. Рівень самозабезпечення господарств повноцінними кормосумішами визначає ступінь їх технологічного розвитку й економічної стійкості - від великих птахофабрик і тваринницьких підприємств до невеликих фермерських ферм. Значну частку собівартості продукції тваринництва становлять витрати на корми, тож підвищення ефективності кормовиробництва безпосередньо впливає на конкурентоспроможність галузі.

Призначення комбікормових підприємств - готувати збалансовані суміші для забезпечення повноцінного добового раціону тварин і птиці. Такі раціони мають містити необхідні поживні речовини, вітаміни й мінерали у визначених кількостях згідно з рецептурою, що позитивно позначається на здоров'ї, рості, продуктивності й збереженні поголів'я.

Із розвитком тваринництва та появою великих комплексів і ферм стало очевидно, що нагодувати значні обсяги поголів'я без збалансованих комбікормів неможливо. Попит на комбікорми суттєво зріс, а необхідні обсяги можуть бути забезпечені переважно промисловим способом - на спеціалізованих виробництвах і у складі переробних ліній сільгосппідприємств. Щоб гарантувати якість комбікормів, необхідне суворе дотримання науково обґрунтованих норм поживності, безпечності та збалансованості з урахуванням виду, віку та напряму продуктивності тварин - від народження до забою.

Для приготування таких сумішей створюють окремі виробничі дільниці, а також розробляють дозувальні пристрої та лінії, які забезпечують точ-

ність рецептур, необхідний хімічний склад після змішування й збагачення, підтверджений дослідженнями, і передбачають повне споживання корму тваринами з безпечним перетравленням усіх інгредієнтів. Водночас перенасичення раціону окремими компонентами може знизити продуктивність, а інколи спричинити захворювання чи падіж поголів'я. У технологічному ланцюгу приготування комбікорму саме дозування є одним із найвідповідальніших і найскладніших процесів, до якого висувають жорсткі вимоги щодо точності визначення маси та об'єму введених компонентів.

Суворе дотримання рецептури можливе лише за наявності надійного дозувального обладнання, яке гарантує точність і постійний контроль кожного етапу, а також дає змогу оперативно вносити коригувальні налаштування під час роботи. Такі можливості мають забезпечувати максимальну точність, високу продуктивність і багатоконпонентне дозування. Важливою характеристикою пристрою є здатність точно дозувати мікродомішки та інгредієнти у малих кількостях. Паралельно обладнання повинно працювати з максимальною завантаженістю за мінімальних трудових та енергетичних витрат і мати високий коефіцієнт корисної дії.

Отже, розроблення та дослідження раціональних конструкцій дозувальних пристроїв для комбікормів є актуальною науково-практичною задачею, розв'язання якої сприятиме підвищенню якості раціонів, стабільності годівлі, економії ресурсів і загальній ефективності тваринницьких виробництв.

1.2 Класифікація дозаторів сипких компонентів

Дозатор - це пристрій для відмірювання та видачі заданої кількості матеріалу. Дозування - технологічна операція відбору необхідної порції компонента з установленою точністю. Точність дозування визначається вимогами технології та економічною доцільністю. Для бездоганного проходження

всього виробничого циклу дозувальне обладнання слід розглядати не як окрему одиницю, а як невід'ємну частину всієї лінії, адже від його надійності та точності безпосередньо залежить якість готової продукції.

Станом на сьогодні розроблено велику номенклатуру дозаторів і допоміжних вузлів, що зумовлено широким спектром технічних вимог і особливостей процесу.

За принципом дії

Вагові - порція вимірюється за масою. Забезпечують високу точність, проте конструктивно та технологічно складніші.

Об'ємні - порція визначається за об'ємом. Конструктивно простіші, але чутливі до змін насипної щільності матеріалу, що впливає на точність.

За характером процесу

Дискретні (порційні)

Об'ємні дискретні: прості за будовою, але з підвищеною похибкою.

Масові дискретні: відокремлюють порцію визначеної маси, точні, проте більш складні.

Безперервні

Вагове безперервне дозування потребує урахування вологості повітря, яка змінює рівноважну вологість і масу сухого компонента, що може спричинити суттєву похибку.

Об'ємне безперервне дозування менш вимогливе до якості продукції та дозволяє стабільно виконувати технологічні операції.

За типом робочого органа

Вібраційні - транспортують і дозують матеріал завдяки коливанням. Перевага - простота, недолік - підвищена похибка.

Шнекові - складаються з бункера з датчиком рівня, шнека, лопатей та розвантажувального вузла (живильник, клапан). Плюси: універсальність, мо-

жливість транспортування на відстань; мінуси: зниження точності при неоднорідній щільності, імовірність стирання матеріалу, непридатність для вологих налипальних сумішей, підвищена енергоємність.

Тарільчасті - достатньо точні, мають широкий діапазон регулювання продуктивності та забезпечують рівномірну подачу дрібнокускових і дрібнозернистих матеріалів. Недоліки: чутливість до зміни гранулометрії, вологості та злежування в бункері.

Барабанні - застосовуються для дозування сипких компонентів. Різновиди: ячеїсті, лопатеві, циліндричні (гладкі, рифлені). В ячеїстих і лопатевих подача визначається об'ємом і кількістю секцій та регулюється частотою обертання. У гладких/рифлених - подача за рахунок тертя/зчеплення з поверхнею барабана і регулювальною заслінкою. Точність і продуктивність суттєво залежать від фізико-механічних властивостей продукту та стабільності його насипної маси.

Стрічкові - придатні для безперервного або квазібезперервного вагового дозування й динамічного зважування. Відрізняються рівномірною подачею, простим обслуговуванням та ремонтпридатністю; водночас мають вищу енергоємність і нижчу точність.

Бункери-дозатори - використовуються для сухих, гранульованих і сипких добавок у різних галузях. Подача в бункер - вручну або механізовано, відбір - за досягнення цільової маси/об'єму. Переваги: простота; недолік - обмежений діапазон регулювання, переважно об'ємний облік.

За способом подачі матеріалу

Гравітаційні - рух матеріалу відбувається самопливом під дією сили тяжіння та атмосферного тиску.

Примусові:

Механічні (переважно електропривод): перетворюють електроенергію на механічний рух виконавчих механізмів; економічні, універсальні, основне

джерело механічної енергії у промисловості.



Рисунок 1 - Класифікація дозаторів сипких кормів

Пневматичні: використовують стиснене повітря; довговічні, екологічні, надійні, швидкохідні та прості в експлуатації. Недоліки: обмежена точність і плавність, нижчий ККД, ризик конденсатуутворення.

Гідравлічні: працюють на рідині; бувають об'ємні (енергія тиску) та гідродинамічні (енергія потоку). Переваги: велике зусилля за компактних розмірів, високий ККД, широкий температурний діапазон; недоліки: вищі витрати та обслуговування, екологічні ризики при витоках, нижча точність для тонкого дозування.

Аналіз конструкцій і принципів роботи дозаторів свідчить, що пошук

раціональних рішень, які поєднують високу точність дозування, низькі енерговитрати, високу продуктивність і надійність, триває безперервно. Для підприємств АПК, що виробляють комбікорми та споріднену продукцію, доцільним і ефективним є застосування шнекових дозаторів завдяки їхній універсальності, надійності та можливості транспортування матеріалу. Цей тип має широкий діапазон пропускну здатності, який задається конструктивними параметрами шнека, а в межах виробничих площ часто достатньо одного вагового модуля, оскільки шнекові системи можуть подавати матеріал на значні відстані.

1.3 Аналіз конструкцій шнекових дозаторів сипучих компонентів

На даний час розроблено значну кількість дозувальних пристроїв для подачі сухих сипучих матеріалів. Основним робочим органом у таких дозаторах виступає шнек, який може розташовуватись горизонтально, вертикально або під певним кутом до горизонту.

На рисунку 1.2 представлений варіант мікродозуючого пристрою, в якому передбачено окремі приводи для дозуючого шнека та допоміжного розвантажувального вузла.

У ваговому бункері встановлено два типи скидачів – верхній однолопатевий та нижній чотирилопатевий. Завдяки вдосконаленню конструкції та застосуванню індивідуальних приводів забезпечується можливість дозувати продукцію з різною текучістю, з ширшими можливостями коригування точності дозування та підвищенням надійності експлуатації обладнання. Недоліком такого підходу є підвищені енерговитрати та необхідність застосування системи логічного контролю для досягнення високої точності дозування. Крім того, під час роботи механічних вузлів відбувається інтенсивне стирання матеріалу.

Новизна конструктивного рішення іншого варіанта шнекового дозатора

зволяє точніше доводити необхідну масу продукту та зменшувати похибку дозування. Перевагою такої схеми є спрощене управління та зниження собівартості виготовлення. Недоліками є знижена точність при роботі з матеріалами різної щільності, підвищений знос елементів при реверсивних режимах та високі пускові струми електроприводів.

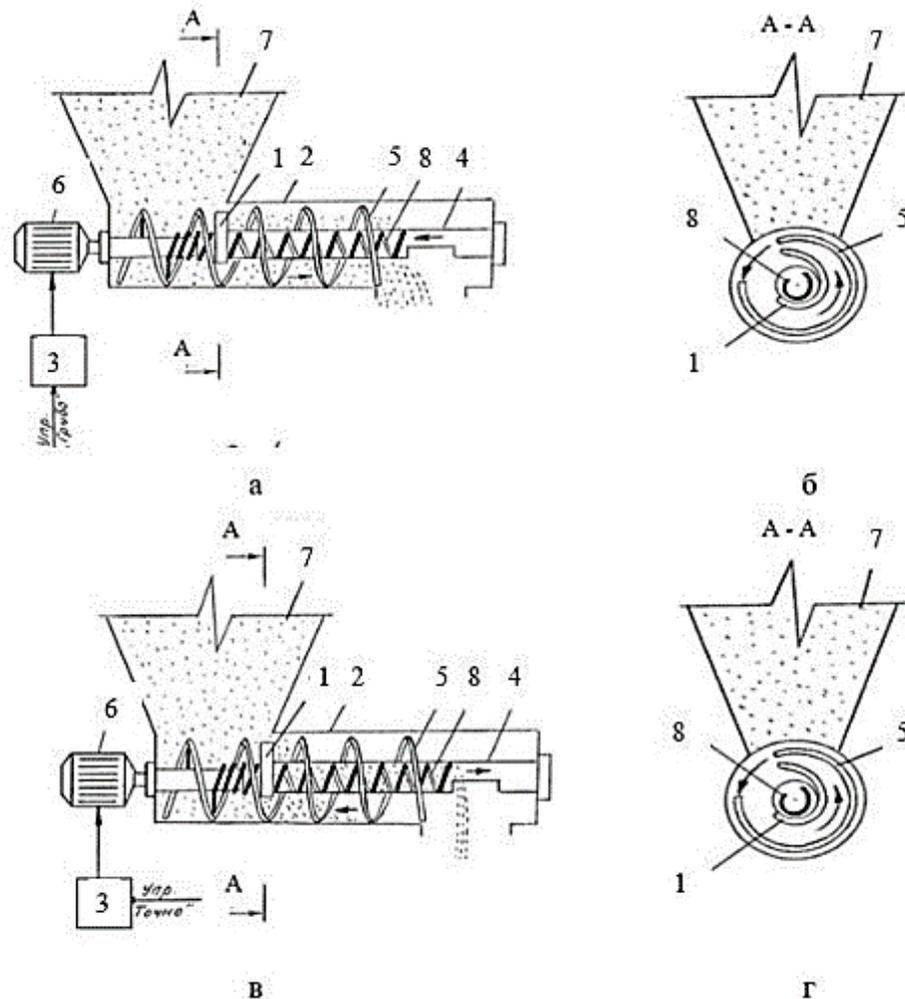


Рисунок 1.3 – Живильник для комкувальних і сипких компонентів (режими «грубо/точно»): а - осьовий переріз (грубе дозування); б - поперечний переріз (грубе дозування); в - осьовий переріз (точне дозування); г - поперечний переріз (точне дозування). 1 - патрубок точного дозування; 2 - патрубок грубого дозування; 3 - реверсивний пускач; 4 - уловлювач матеріалу; 5 - шнек великого діаметра, ленточний, порожнистий; 6 - електропривод; 7 - бункер; 8 - шнек малого діаметра, спіральний.

Дозатор дискретного типу вагової дії (рисунок 1.4) призначений для роботи з дрібнодисперсними, потенційно вибухонебезпечними сипучими продуктами. У конструкції застосовано комбінацію вагового вимірювача, надвагового бункера, шнекового живильника та підвісного ковша. Запропонована конструкція спрямована на підвищення безпеки роботи за рахунок оптимізації форми ковша, додаткових елементів направлення матеріалу та зміни геометричних параметрів бункера, що усуває неконтрольований вихід матеріалу, знижує ризик утворення склепінь та підвищує стабільність дозування. Недоліком залишається зниження точності при роботі з матеріалами різної густини та підвищений механічний знос елементів.

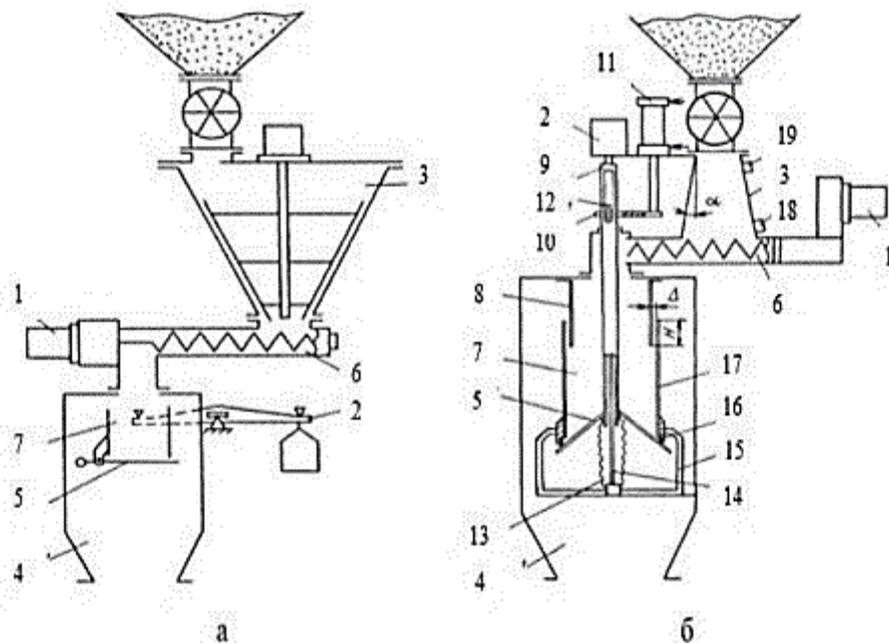


Рисунок 1.4 – Ваговий дозатор дискретної дії для порошкоподібних матеріалів: а - ескіз дозатора типу ДПД-10; б - загальний вигляд вагового дозатора дискретної дії. 1 - електропривод; 2 - ваговий вимірювач; 3 - бункер; 4 - підвісна точка; 5 - конічне днище; 6 - шнековий живильник; 7 - вантажопідіймальний ківш; 8 - обід; 9 - порожниста тяга; 10 - вантажоприймальний ківш; 11 - пневмоциліндр; 12 - поперечна планка; 13 - гофрована трубка; 14 - тяга; 15 - кронштейн; 16 - торцеве ущільнення; 17 - обичайка; 18 - датчик нижнього положення; 19 - датчик верхнього положення.

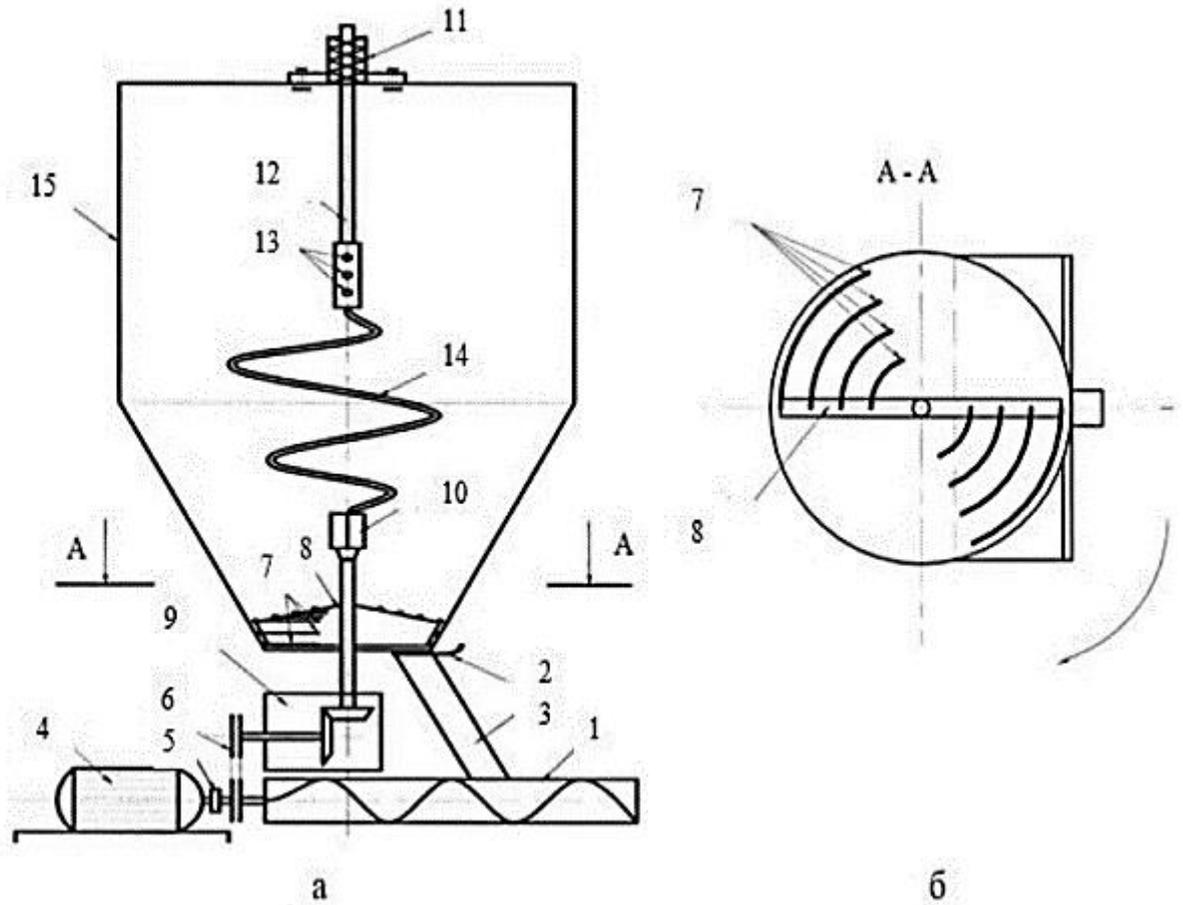


Рисунок 1.5 – Бункер-дозатор сипких кормів: а - загальний вигляд бункера-дозатора; б - розріз А-А. 1 - шнек; 2 - регулювальна заслінка; 3 - спрямувальний рукав; 4 - електропривод; 5 - муфта; 6 - клинопасова передача; 7 - палець; 8 - лопаті; 9 - вал конічного редуктора; 10 - телескопічне з'єднання; 11 - гайка; 12 - вал; 13 - втулка; 14 - стрижнева спіраль; 15 - циліндрична ємність.

У наступному варіанті конструкції (рисунок 1.5) пропонується встановлення стрижневої спіралі зі змінним кроком та діаметром на верхній осі симетрії бункера з можливістю оберտального та зворотно-поступального переміщення. На лопатях розміщують пальцеподібні гребінки різної довжини, загнуті у напрямку обертання. Лопасті та спіраль обертаються по одній осі від електропривода шнека через клиноремінну передачу, що з'єднує конічний редуктор з муфтою.

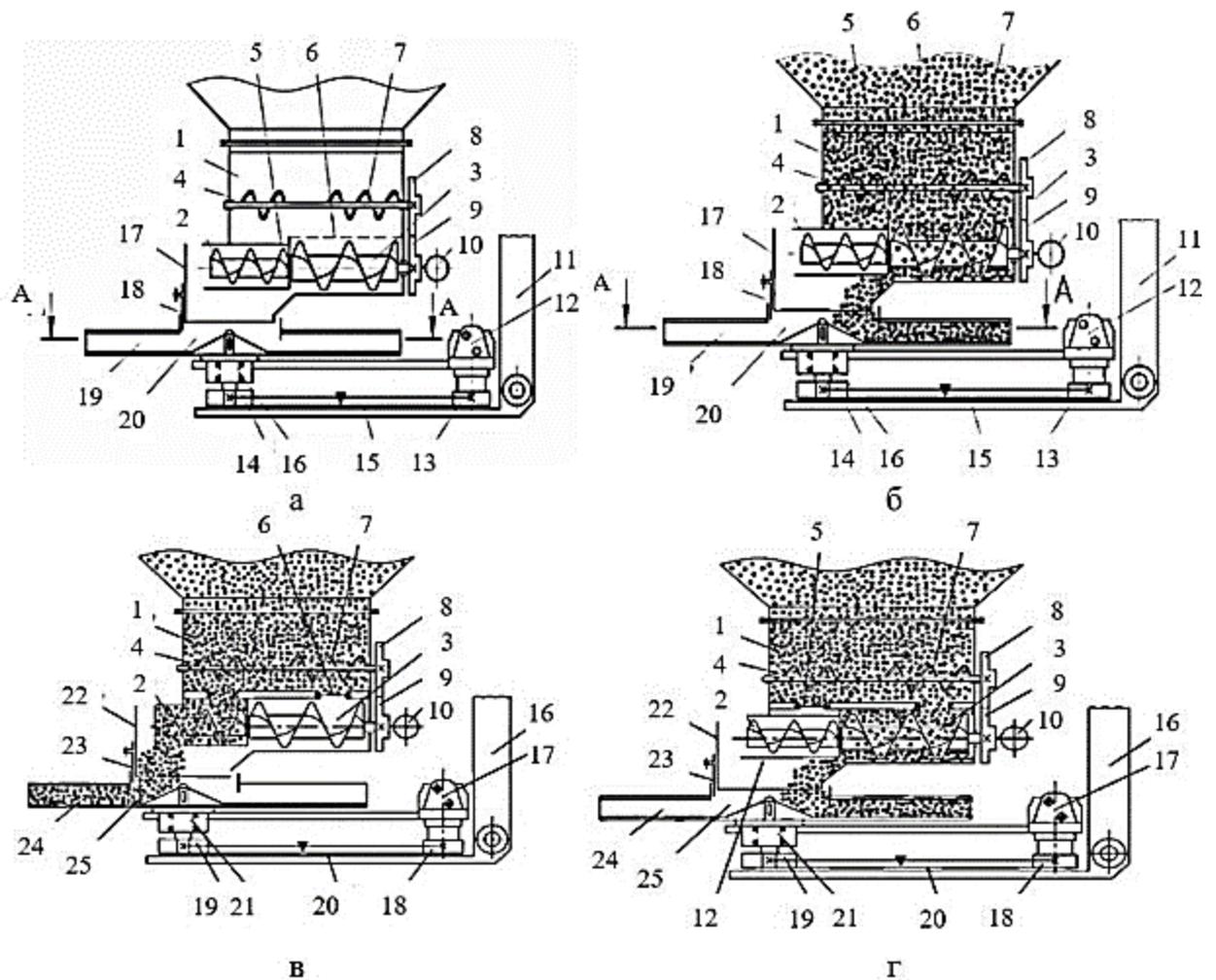


Рисунок 1.6 – Шнековий дозувальний пристрій: а - загальний вигляд; б - велика і мала камери; в - переміщення дозованого інгредієнта в малій камері; г - переміщення дозованого інгредієнта у великій камері. 1 - корпус завантажувальної камери; 2 - ступінь малого шнека; 3 - ступінь великого шнека; 4 - малий ворушник; 5 - мала заслінка (шибер); 6 - велика заслінка (шибер); 7 - великий ворушник; 8 - шестерня; 9 - шестерня шнеків; 10 - електропривод; 11 - велика камера; 12 - мала камера; 13 - приймальна воронка великої камери; 14 - приймальна воронка малої камери; 15 - роздільна перегородка; 16 - рама; 17 - гідромотор; 18 - ведучий шків; 19 - ведений шків; 20 - клиновий ремінь; 21 - підшипниковий вузол; 22 - розвантажувальна камера; 23 - регульовальна заслінка; 24 - розподільчий диск; 25 - камера розгону; 5 і 6 - шибєрні заслінки; 11, 12 - відповідно велика і мала камери.

Дозувальний пристрій має низку обмежень: невеликий діапазон регу-

лювання подачі, недостатню точність, інтенсивний знос конструктивних елементів і загалом складну конструкцію.

З метою підвищення точності дозування у шнековому дозаторі запропоновано застосувати двоступеневий шнек і розмістити його ступені у великій та малій камерах, відокремлених перегородкою, що розташовані у підбункерній зоні пристрою (рисунок 1.6).

Описаний дозатор містить завантажувальну камеру з горизонтально розташованими шибєрними заслінками, воружники з малою та великою гвинтовими навивками, змонтованими на горизонтальних валах малого і великого шнеків, та електродвигун. Двоступеневий шнек обертається від електродвигуна з однаковою частотою обертання ступенів і їх синхронною роботою.

Разом з тим пристрій має суттєві недоліки: складну конструкцію, відносно великі габарити та підвищену металоемність.

Шнековий дозатор РТ-УМ-36 призначений для роботи в безперервному режимі за умови сталої автоматичної подачі сипкого продукту у завантажувальний бункер. Керування побудоване на програмованому логічному контролері, який у реальному часі відстежує відміряну дозу, що подається шнековим живильником. Обладнання придатне для порошкоподібних і сильно пилючих харчових та нехарчових матеріалів. Основне обмеження - неможливість багатоконпонентного дозування.

Український виробник «Upack-tech». Комплекс у складі фасувальної машини, шнекового дозатора АФ-35-Ш і транспортерного обладнання ЗТШ-1 (рис. 1.7, а). Дозатор Н-1 з підлоговим бункером для пилючих продуктів (рис. 1.7, б).

Принцип роботи (спільні риси): пилючий продукт (цукрова пудра, крохмаль тощо) транспортується зі завантажувального бункера в ємність фасувально-упаковочного автомата через металевий рукав із розташованим усередині шнеком, який обертає електропривод. Таке рішення мінімізує пиління. Інтегрований мікропроцесорний блок керування контролює рівень матеріалу в бункері автомата, цикл дозування й пакування, роботу електроприводів та

обробляє сигнали вагових датчиків. Маса дози визначається кількістю обертів шнека, що задається частотним перетворювачем.

Відмінності між АФ-35-Ш та Н-1: об'єм бункера, довжина робочого органу, продуктивність, енергоспоживання, алгоритми регулювання та габарити.

Недоліки обох класів рішень: відносно складна конструкція та підвищена енергоємність.



Рисунок 1.7 – Загальний вигляд дозаторів: а - фасувальна машина зі шнековим дозатором АФ-35-Ш і транспортером ЗТШ-1; б - шнековий дозатор Н-1 з підлоговим бункером.

На ринку помітні системи з можливістю одночасного дозування кількох компонентів:

TrueWeigh™ (Серія TWB, Велика Британія) - змішувачі-дозатори для сухих сипких інгредієнтів (рис. 1.8, а). Забезпечують високу точність (близько $\pm 0,5\%$ від завдання), стабільну роботу з різними фракціями та щільністю. Керування - ПЛК із координацією потоків і компенсацією зміни насипної щільності в кожному живильнику. Компоненти об'єднує каскадний статичний змішувач. Є можливість синхронізації швидкості лінії через енкодер/карту керування приводом. Мінуси: складність конструкції, низька ремонтпридатність, висока вартість сервісу та ЗЧ.

DEGA (GDM-серія, Італія) - гравіметричні вагові дозатори (рис. 1.8, б) для порошків і грануляту. Дозування 2–6 компонентів кількома шнеками з індивідуальним зважуванням кожної порції, автоматичним порівнянням «факт/завдання» та подачею в бункер змішувача. Допускають монтаж на обладнанні з постійною контрольованою вібрацією. Мінуси: складність, висока вартість обладнання й ЗЧ.



а



б



в



г

Рисунок 1.8 – Загальний вигляд багатокomпонентних/вагових дозувальних систем: а - змішувач-дозатор для сухих сипких інгредієнтів ТWВ 07-4; б - ваговий дозатор GDM-250; в - ваговий дозатор УДМ-300; г - шнековий дозатор SHINI SCM-1637

«Альтапром» (УДМ-300) - ваговий дозатор для точного дозування сухих компонентів і сумішей із масою дози від ~0,5 кг (рис. 1.8, в). Може працювати напівавтоматично або в автоматичному циклі. Переваги: універсальність, простота програмування, висока точність завдяки кільком електроприводам. Недоліки: складність регулювання/обслуговування, підвищена енергоємність.

SHINI (SCM-серія, Китай) - об'ємні автоматичні шнекові дозатори (рис. 1.8, г) з широким діапазоном частот обертання, мотор-редукторами із передавальним відношенням $\sim 38:1$ та встановлюваними шнеками 12/16/20/30 мм. Сильні сторони: висока продуктивність і повторюваність. Обмеження: складність та висока ціна деяких конфігурацій.

1.4 Висновки за розділом

На підставі опрацьованих наукових джерел, патентних рішень і схем дозувальних пристроїв для сухих сипких компонентів встановлено, що пошук раціональних конструкцій шнекових дозаторів та створення надійних, точних і енергоефективних систем із мінімально необхідною номенклатурою вузлів і агрегатів залишається актуальним. Кінцева мета таких рішень - забезпечити високу продуктивність і стабільну якість готового продукту при мінімальних витратах та відповідності вимогам сучасних технологічних ліній.

За результатами аналізу доцільним є застосування дозаторів зі шнековим транспортно-розподільним механізмом, оскільки вони поєднують:

- простоту конструкції та обслуговування;
- надійність і порівняно невисоку вартість;
- зручну інтеграцію у комплексні лінії приготування комбікормів.

Для підвищення точності дозування компонентів із різними фізико-механічними властивостями обґрунтовано конструкцію з двома шнеками, що мають окремі приводи й виконують різні функції:

- основний (більший) шнек забезпечує продуктивну базову подачу;
- додатковий (менший) шнек “досипки” виконує тонке коригування

маси дози в зоні точного дозування.

Таке компонування дозволяє розвести режими “грубо/точно”, зменшити сумарну похибку, стабілізувати витрату та підвищити технологічну гнучкість дозатора без істотного ускладнення обслуговування лінії.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ І РЕЖИМІВ РОБОТИ ШНЕКОВОГО ДОЗАТОРА СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1 Опис схеми та алгоритму дозування

Під час створення двошнекового дозатора компонентів комбікорму було використано результати досліджень із галузі дозувального обладнання та технологічних процесів дозування, а також спостереження за роботою розробленої системи з урахуванням конструктивних особливостей в умовах виробництва. Дозувальний пристрій для сухих сипких компонентів містить накопичувальний бункер 4 з механізмом розвантаження 7, установлений на тензодатчики 5, закріплені на рамі 6. Завантаження продукту в бункер-дозатор 4 здійснюється зі бункера-накопичувача 2 шнеком 3, який приводиться в рух електродвигуном 1. Кількість бункерів-накопичувачів і шнеків може змінюватись залежно від числа компонентів суміші за рецептурою продукції.

Керування системами та контроль роботи дозувального пристрою, а також введення технологічних параметрів виконуються з сенсорної панелі керування за допомогою спеціально розробленої програми.

Принцип дії такий: на сенсорному дисплеї електричної шафи з програмованим контролером задаються необхідні технологічні параметри, зокрема уставки: частоти дозаторів (Гц), частоти «досипки» (Гц), упередження «досипки» (кг); затримка між етапами засипання (с), поріг увімкнення швидкості «досипки» (%), тайм-аут (захист) етапів засипання (с), частка компонентів (%) або маса компонентів (кг). Далі вмикаються механізми дозувального пристрою, здійснюються контроль і керування технологічним процесом згідно із заданою програмою. За допомогою шнека 3 з бункера-накопичувача 2 відбувається транспортування дозованого компонента і його подача до накопичувального бункера 4. Після досягнення заданого значення маси від тензодатчиків

5 надходить команда, і електропривод шнека 1 вимикається. Далі в роботу вступає механізм розвантаження 7, і розрахована порція компонента надходить у змішувач, де переміщується з іншими інгредієнтами до отримання однорідної маси відповідно до заданої рецептури продукції.

Під час розроблення методики системи дозування сипких компонентів були використані рекомендації щодо проведення експериментів. Функціонування модуля дозування можна подати у вигляді схеми (рисунок 2.1). Критеріями модуля дозування сипких компонентів є пропускна здатність і точність дозування. Основним завданням є досягнення високої точності дозування за максимально можливої пропускної здатності. Пропускна здатність переважно залежить від фізико-механічних властивостей хМ дозованого компонента і конструкційних параметрів хКР шнеків, а на точність дозування впливають установлені технологічні параметри хТР процесу.

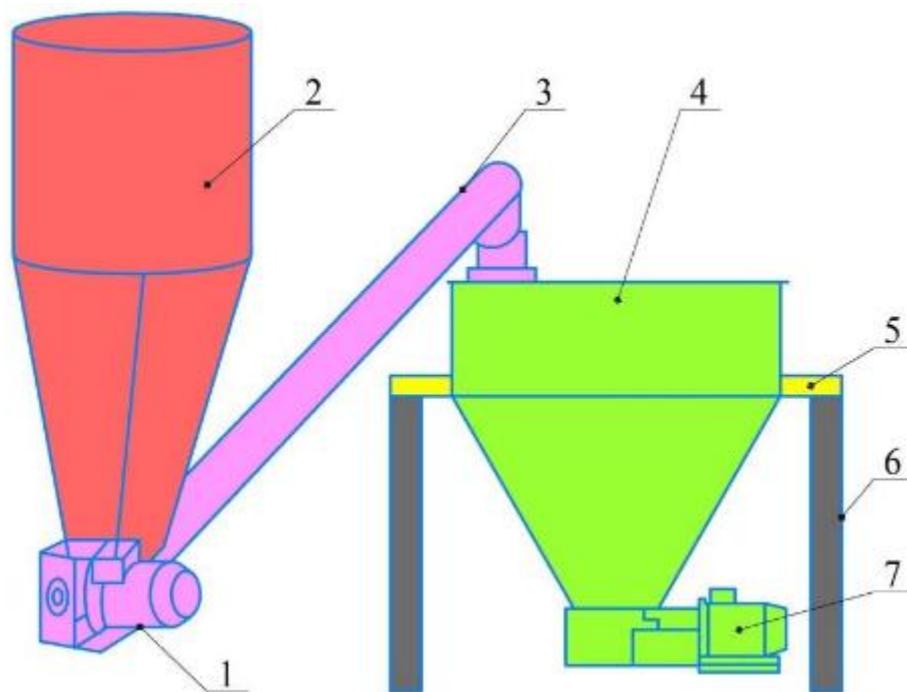


Рисунок 2.1 – Схема системи дозування сухих сипких компонентів: 1 – електродвигун шнека; 2 – бункер-накопичувач; 3 – шнек; 4 – накопичувальний бункер; 5 – ваговимірвальні тензодатчики; 6 – рама; 7 – механізм розвантаження

До складу комбікорму додаються інгредієнти. На пропускну здатність дозувального обладнання впливають фізико-механічні властивості введеного компонента, такі як: вологість $xM1$, насипна густина $xM2$, гранулометричний склад $xM3$, кут природного відкосу $xM4$, злежуваність $xM5$, адгезія $xM6$, коефіцієнти внутрішнього тертя та тертя частинок об поверхню $xM7$ і сипкість $xM8$ (рисунок 2.2). Фізико-механічні властивості дозованих інгредієнтів xM розглядаються як незалежні фактори. Для досягнення високої точності та великої пропускну здатності під час дозування необхідно змінювати конструкційні параметри xKP завантажувальних шнеків. Найбільш значущими є: діаметр шнека $xKP1$, крок витка $xKP2$, висота витка $xKP3$, внутрішній діаметр кожуха шнека $xKP4$, кут підйому гвинтової лінії $xKP5$. Якщо обраний шнек за критерієм пропускну здатності не відповідає вимогам, його параметри змінюють або підбирають альтернативний шнек. Якщо шнек із заданими параметрами відповідає обраному компоненту і забезпечує потрібну пропускну здатність, його оцінюють за другим показником - точністю дозування. У разі незадовільних результатів точності коригують технологічні параметри xTP функціонування шнека. За цих умов точність дозування регулюють зміною таких параметрів, як: основна частота обертання шнека $xTP1$, частота обертання під час «досипки» матеріалу $xTP2$, упредження «досипки» матеріалу $xTP3$, затримка між етапами засипання $xTP4$, увімкнення швидкості «досипки» $xTP5$, тайм-аут етапів засипання $xTP6$. Найбільший вплив на пропускну здатність системи має частота обертання шнека $xTP1$. Для зменшення похибки дозування наприкінці подачі компонента шнеком програма керування знижує частоту обертання з $xTP1$ до $xTP2$. Час переходу з основної частоти на частоту «досипки» задається величиною $xTP5$. Вона відображає частку навішування, обчислену від загальної маси порції у відсотках, і за її допомогою програма здійснює перехід на іншу частоту обертання шнека. Під час подачі компонента

шнеком частина матеріалу перебуває у вільному падінні з висоти бункера дозатора і в момент вимикання не впливає на зважувальний механізм.

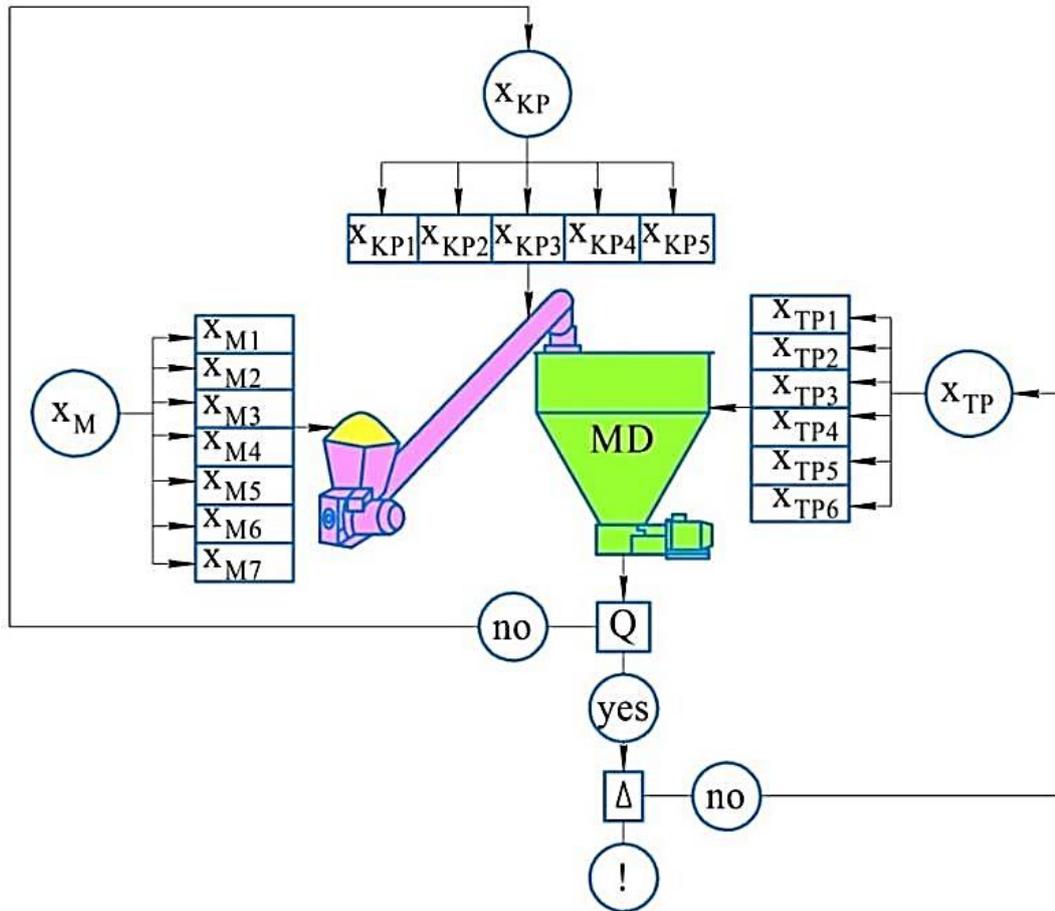


Рисунок 2.2 – Схема процесу підбору параметрів системи дозування сухих компонентів комбікорму

Для врахування цієї величини встановлюється параметр x_{TP3} - упередження «досипки» матеріалу, що вимірюється в кілограмах. У момент, коли встановлена маса компонента досягне значення x_{TP3} кг, шнек вимикається. Якщо технологічним процесом передбачено багатоконпонентне дозування, у лінію дозування додатково інтегрують потрібну кількість бункерів-накопичувачів і шнеків. Використовуючи значення x_{TP4} , програмується інтервал часу

для перемикання між шнеками. Для забезпечення сталої маси навішування потрібен певний період стабілізації, який задається значенням x_{TP6} . За умови коректного вибору алгоритму технологічних значень x_{TP} , попередньо встановлених для шнека і дозованого компонента, виконується процес дозування.

На підставі викладеного алгоритм технологічних операцій для розробленої системи дозування сухих компонентів подається у такому вигляді: формування складу продукції, контроль фізико-механічних властивостей компонентів, підбір шнека відповідно до необхідної пропускної здатності дозатора та технологічних умов, введення заданих технологічних величин, що забезпечують потрібну точність дозування.

2.2 Опис процесу дозування

Основні конструкційні елементи пристрою подано на рисунку 2.3 і включають: корпус 1, шнек 2 основної насипки з електроприводом 3, приймальний бункер 4 для завантаження компонента, вивантажувальний патрубок 5, шнек 6 точної досипки, розміщений у корпусі 7 і приведений від електропривода 8, завантажувальний бункер 9.

Дозувальний пристрій працює так. У бункер 4 завантажується сипкий компонент. На електричній комутаційній шафі зі вбудованим сенсорним дисплеєм і контролером задаються потрібні технологічні параметри, після чого здійснюються керування та контроль процесу. За подачі напруги на асинхронний електропривод 3 через редуктор передається обертальний рух на шнек 2; відбувається захоплення частинок і їх транспортування крізь корпус 1 до вивантажувального патрубку 5. Далі компонент надходить у тару, розміщену на приймальному майданчику з ваговимірювальними тензодатчиками, де відбувається зважування.

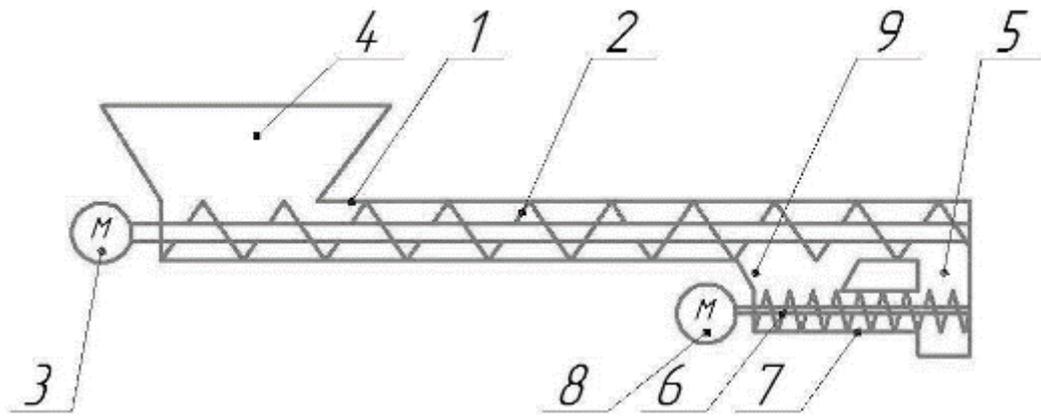


Рисунок 2.3 – Шнековий дозатор сухих сипких компонентів: 1 – корпус; 2 – основний шнек; 3 – електропривод; 4 – приймальний бункер; 5 – вивантажувальний патрубков; 6 – шнек точної досипки; 7 – корпус шнека точної досипки; 8 – електропривод точної досипки; 9 – завантажувальний бункер

Після завершення основної насипки (близько 85–95 % від заданої маси) система керування вимикає асинхронний електропривод 3 шнека 2 основної подачі та вмикає електропривод 8 шнека 6 точної досипки. Компонент під дією витків зі бункера 9 надходить у тару на приймальному майданчику. Система керування безперервно моніторить сигнали тензодатчиків і, досягнувши заданої маси як на етапі основної насипки, так і на етапі досипки, формує команди на вимкнення електродвигунів.

Під час аналізу процесу дозування виокремлено такі особливості роботи:

- шнековий дозатор приводиться в дію з частотою обертання n і забезпечує номінальну продуктивність Q ;
- сипкий компонент переміщується в корпусі дозатора до прорізу (вивантаження), де здійснюється повне видалення транспортованого матеріалу з робочого каналу;
- далі компонент осипається з висоти h_i під дією сили тяжіння на горизонтальну площину приймального майданчика, де формується конус із сипкого матеріалу з кутом природного відкосу φ (рисунок 2.5, а);

- за надмірної концентрації на поверхні маси m сипкого компонента активується датчик, і швидкість обертання шнека дозатора зменшується до n_d . Перемикання пристрою в режим досипки гарантує продуктивність дозатора Q_d ;
- тривалість роботи дозатора в режимі досипки t_d встановлюється програмно, після чого частоту обертання знижують до нуля (шнек зупиняється).

Графік роботи шнекового дозатора подано на рисунку 2.4.

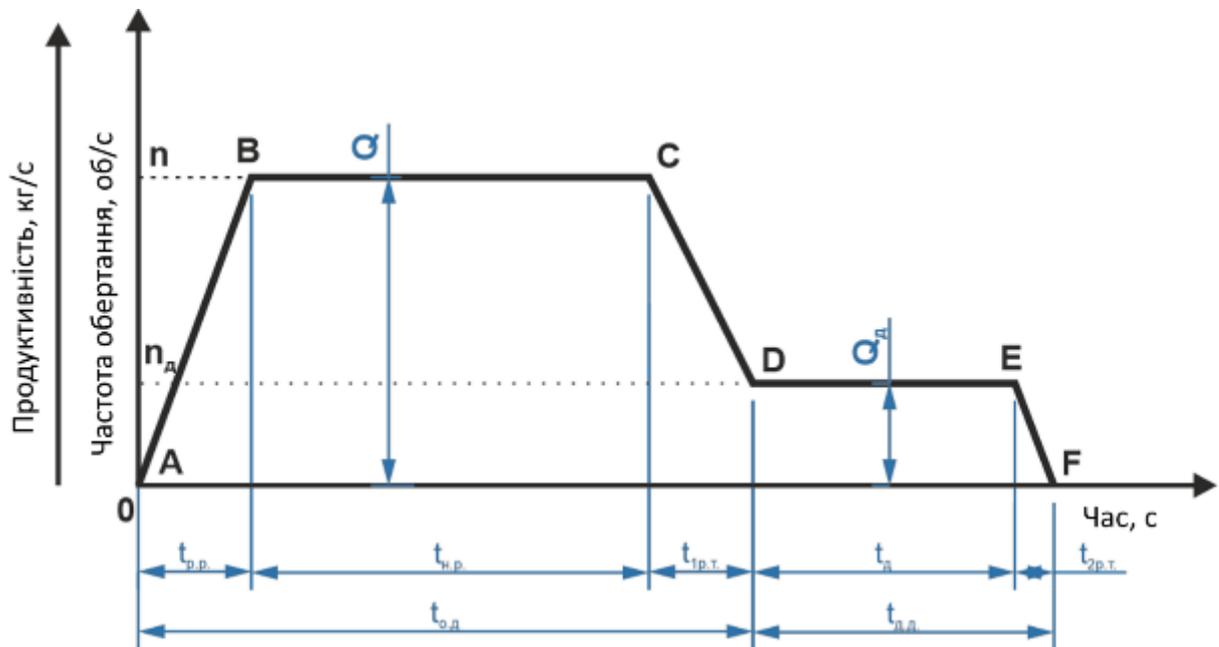


Рисунок 2.4 – Графік роботи шнекового дозатора, де:
 $t_{р.р.}$ – період режиму розгону; $t_{н.р.}$ – період роботи в номінальному режимі;
 $t_{г.р.1}$, $t_{г.р.2}$ – періоди режиму гальмування; t_d – період досипки

Із графіка видно, що основна частина матеріалу подається за максимально можливої частоти обертання шнека. У цьому режимі можливий пульсаційний характер потоку матеріалу, що не гарантує сталої й рівномірної подачі.

Наприкінці дозування частота зменшується до n_d , аби знизити похибку; одночасно зменшуються і пульсації потоку. З графіка також випливає, що зупинка вала шнека відбувається поступово, що може спричинити збільшення фактичної маси навішування порівняно із заданою.

Тому потрібне обґрунтування режимів роботи дозатора та виявлення впливу його параметрів на точність. Разом із тим, за зниження частоти до мінімуму, аж до зупинки, пульсації зменшуються, і на ділянці гальмування ЕФ потік дозованого матеріалу стає суцільним і безперервним.

Під час теоретичних розрахунків для обґрунтування впливу параметрів шнекового дозатора на фактичну масу навішування прийнято такі допущення:

1. Сипкий компонент, що переміщується шнековим дозатором і перебуває у стані вільного падіння, розглядається як суцільний потік.
2. Обвалювання шару компонента в міжвитковому просторі під час зупинки (уповільнення) шнека не враховується.
3. За початкову точку падіння матеріалу з дозувального пристрою береться положення центра мас шару u_c у дозаторі (рисунок 2.5, б), а за кінцеву - координата вершини конуса, сформованого із сипкого матеріалу.
4. Шар, що падає, вважається симетричним і рівномірним упродовж усього падіння; його допустимо подати у вигляді елементарної кількості мінімальної висоти (товщини) з площею основи, пропорційною площі вивантаження.
5. Затримка спрацювання датчика вважається мінімальною і може не враховуватися.
6. Кутове зміщення сегмента $S_{\text{сег}}$ під час обертання шнека у розрахунках не враховується.

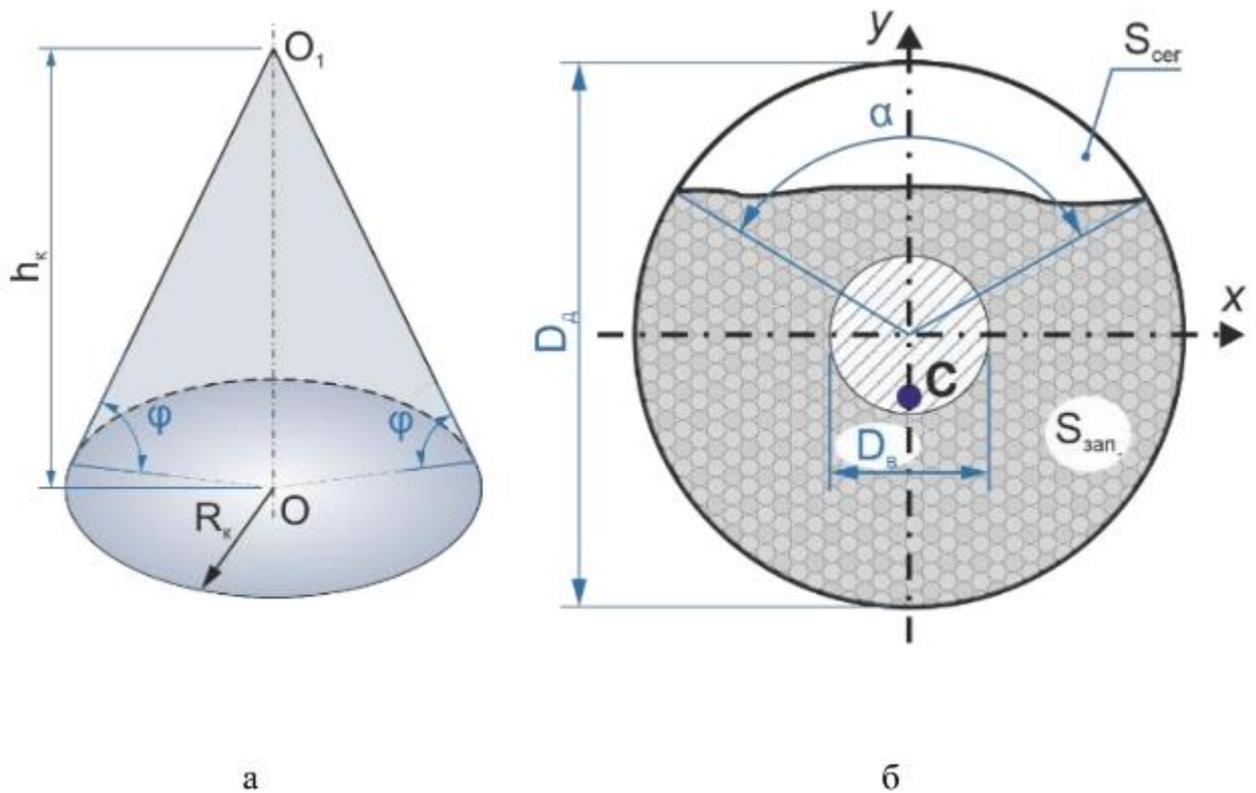


Рисунок 2.5 – Розрахункові схеми: а – схема до визначення об’єму конуса; б – центр ваги матеріалу, розташованого в міжвитковому просторі шнека

$$M = M_{o.d.} + M_{d.d.} = M_{p.p.} + M_{n.p.} + M_{1p.g.} + M_d + M_{2p.g.} \quad (2.1)$$

де M - загальна маса навішування (цільова маса порції);

$M_{o.d.}$ - основна маса дозування (до переходу в «досипку»);

$M_{d.d.}$ - маса додаткового дозування («досипка» до заданої маси);

$M_{p.p.}$ - маса, подана під час розгону (від 0 до n);

$M_{n.p.}$ - маса, подана в номінальному режимі при частоті n ;

$M_{1p.g.}$ - маса під час першої фази гальмування (від n до nd);

$M_{2p.g.}$ - маса під час другої фази гальмування (від nd до 0);

M_d - маса, подана в режимі «досипки».

З урахуванням специфіки роботи механізму дозатора та контрольно-вимірювальної апаратури доцільно розглядати процес з позиції приймального майданчика. Тоді:

$$M = M_{\text{о.д.}} + M_{\text{д.д.}} = M_0 + [M_{\text{п}} + M_{1\text{р.г.}} + M_{\text{д.}} + M_{2\text{р.г.}}], \quad (2.2)$$

де M_0 - маса на приймальному майданчику в момент спрацювання датчика;

$M_{\text{п}}$ - маса у вільному падінні в перехідний момент

Основну і додаткову частки навішування зручно подати у вигляді часток від необхідної маси M :

$$M_{\text{о.д.}} = a \cdot M, \quad (2.3)$$

$$M_{\text{д.д.}} = (1 - a) \cdot M \quad (2.4)$$

де a - частка (відсоток) від заданої маси дозування.

Щоб отримати потрібну додаткову масу $M_{\text{д.д.}}$, усі доданки виразу (2.2) мають відповідати встановленим критеріям. Далі обчислюються складові виразу (2.2) для забезпечення необхідної точності навішування.

Розрахунок маси сипкого матеріалу, дозованого під час гальмування шнека дозатора

Продуктивність шнекового дозувального пристрою визначають за залежністю:

$$Q = TS\psi\rho nk, \quad (2.5)$$

де T – крок витків шнека;

S – площа поперечного перерізу дозатора;

ψ – ступінь заповнення перерізу сипким матеріалом;

ρ – насипна густина;

n – частота обертання шнека;

k – поправковий коефіцієнт на кут нахилу (для горизонтального шнека $k=1,0$).

Масу, що видається у режимі «досипки», обчислюють як:

$$M_{\delta} = Q_{\delta} t_{\delta} = T S \psi \rho n_{\delta} k t_{\delta}, \quad (2.6)$$

Масу, яку переміщує шнек у режимі гальмування, подають у вигляді:

$$M_{\text{п.г.}} = T S \psi \rho k \int_0^{t_{\text{п.г.}}} n(t) dt, \quad (2.7)$$

де закон зміни частоти (перша апроксимація лінійною функцією) записують як:

$$n(t) = \frac{n_k - n_0}{\Delta t_{\text{п.г.}}} t + n_0, \quad (2.8)$$

З урахуванням (2.8) інтеграл (2.7) набуде вигляду:

$$M_{\text{п.г.}} = T S \psi \rho k \int_0^t \left[\frac{n_k - n_0}{\Delta t_{\text{п.г.}}} t + n_0 \right] dt, \quad (2.9)$$

Після інтегрування отримують:

$$M_{1\text{п.г.}} = T S \psi \rho k \left(\frac{n_k - n_0}{2\Delta t_{1\text{п.г.}}} t_k^2 + n_0 t_k \right), \quad (2.10)$$

Формула (2.9) оцінює масу, переміщену шнеком при зниженні частоти з n_0 до n_k у ділянці $t_{1\text{п.г.}}$. Для ділянки $t_{2\text{п.г.}}$, де $n_k = 0$, маємо:

$$M_{2p.t.} = TS\psi\rho k \left(-\frac{n_0}{2\Delta t_{2p.t.}} t^2 + n_0 t_k \right), \quad (2.11)$$

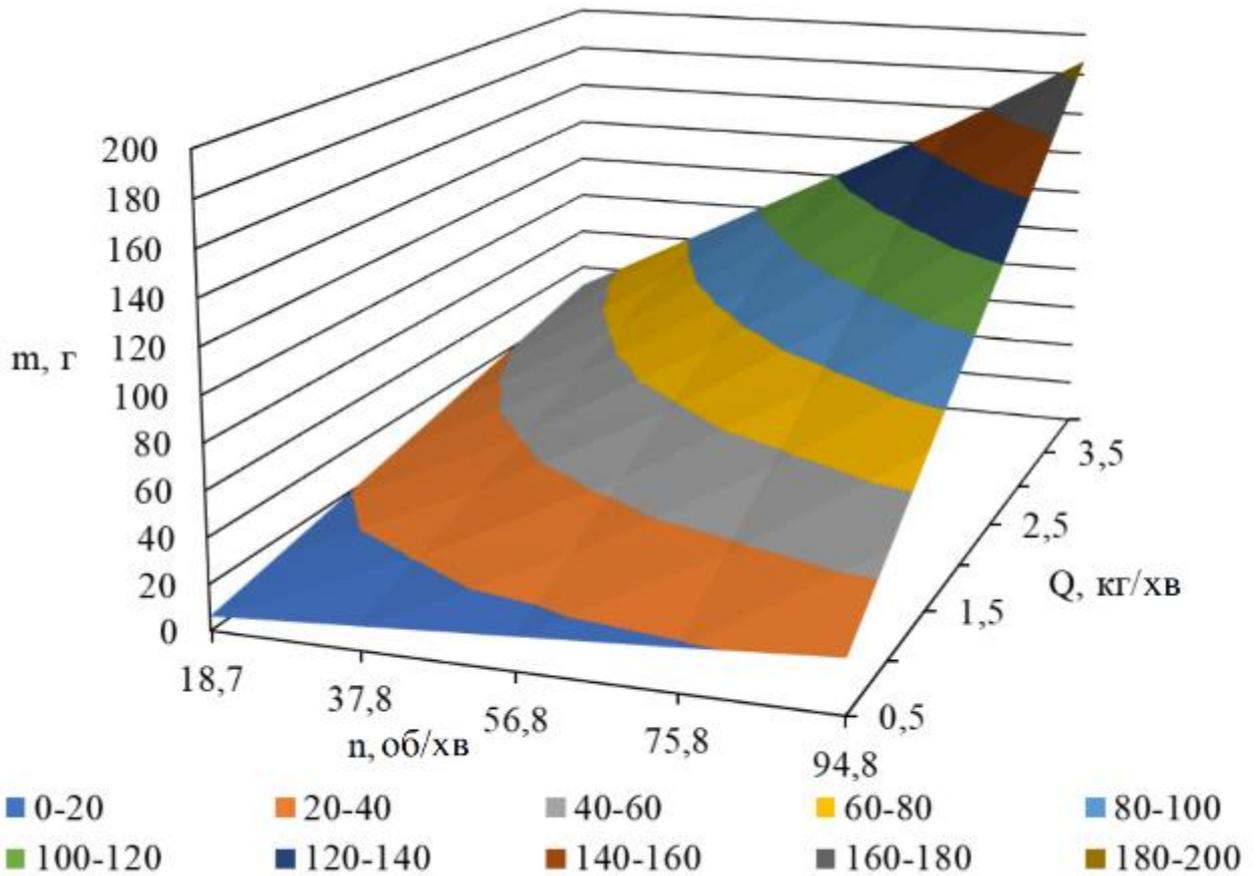


Рисунок 2.6, а – Поверхня, що ілюструє вплив частоти обертання шнека та подачі компонента на масу, переміщену в режимі гальмування.

У досліджуваному інтервалі частоти обертання ($\approx 18,7 \dots 94,8 \text{ хв}^{-1}$) при збільшенні частоти в 5 разів кількість матеріалу, що транспортується шнеком, зростає приблизно у 3,7 раза. Мінімальна подача для розглянутого шнека становить близько 0,8 кг/хв. Отже, найменша маса, що може бути переміщена під час гальмування, становить $\approx 10 \text{ г}$; за максимальної частоти $n \approx 94,8 \text{ хв}^{-1}$ і подачі $Q \approx 0,8 \text{ кг/хв}$ фактична маса навішування становить $\approx 37 \text{ г}$.

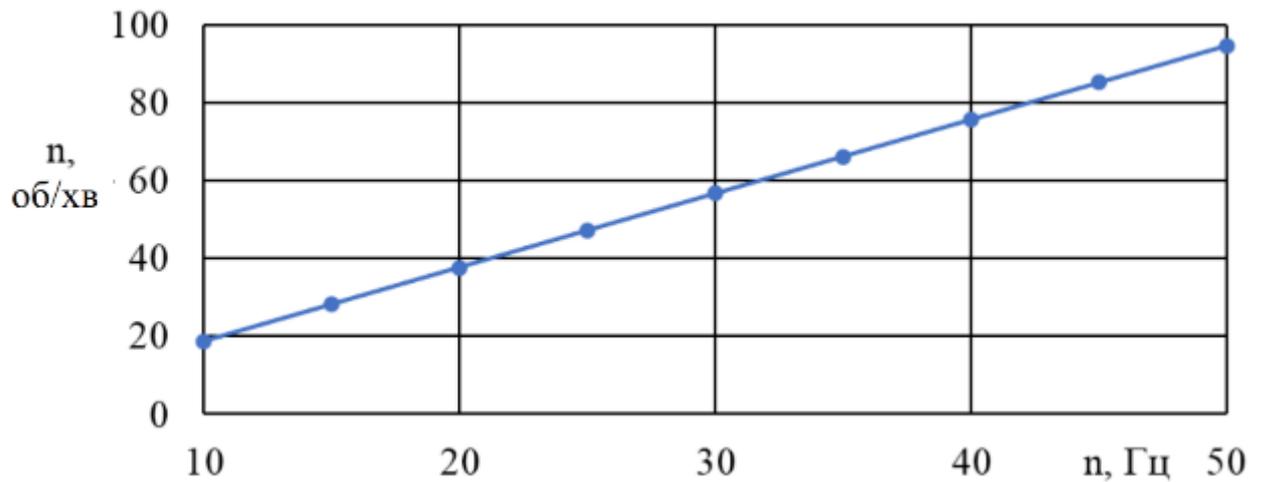


Рисунок 2.6, б – Вплив частоти струму на частоту обертання шнека дозатора.

2.3 Визначення маси сипкого компонента, що перебуває у вільному падінні

З урахуванням безперервності потоку частинок сипкого матеріалу, які насипом потрапляють на горизонтальний майданчик у момент спрацювання датчика та початку гальмування шнека, певна частина матеріалу залишається у повітрі та не впливає на ваговимірвальний сигнал, збільшуючи похибку дозування. Сформований стовп матеріалу у падінні має висоту $h_{п\{п\}}$. Тоді масу, що перебуває у вільному падінні, подамо як функцію від продуктивності шнека:

$$M_{п} = Q t_{п}, \quad (2.12)$$

Розрахункова модель для встановлення висоти падіння та виведення рівняння руху частинок наведена на рисунку 2.7.

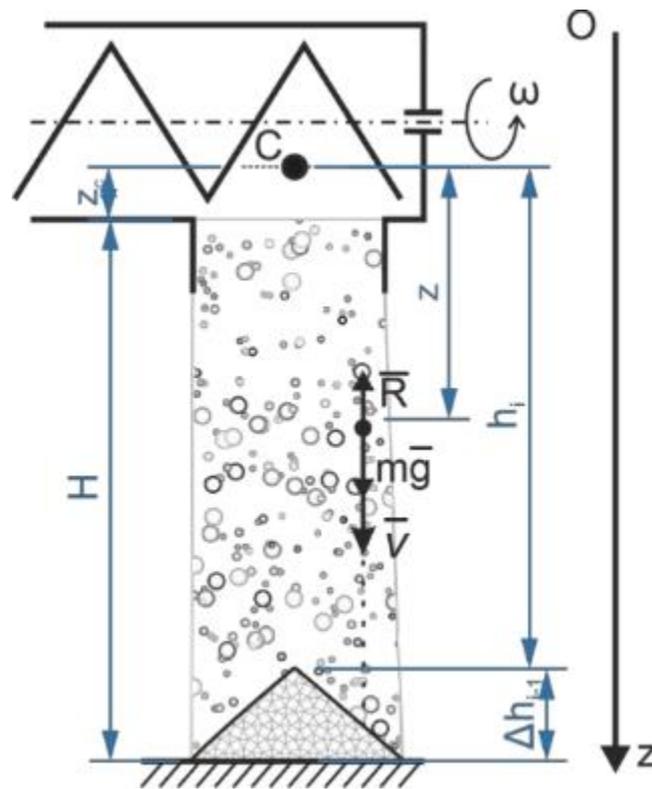


Рисунок 2.7 – Розрахункова модель до визначення моменту польоту елемента сипкого компонента

Фактична висота падіння змінюється зі зростанням висоти конуса на сипу. Залежність має вигляд:

$$h_i = H + \hat{z}_c - \Delta h_{i-1}, \quad (2.13)$$

де H – відстань від вивантажного прорізу дозатора (нижньої точки конструкції) до горизонтальної площини приймального майданчика (установча висота);

\hat{z}_c – відстань від точки центра мас переміщуваного шару компонента в поперечному перерізі шнека до його нижньої точки конструкції (рисунок 2.7);

Δh_{i-1} – фактична висота конуса, утворена попередніми $i-1$ елементами;

h_i – поточна висота падіння i -ї частини матеріалу.

Оскільки конфігурація на рисунку 2.5, б симетрична відносно осі у, координата центра мас за віссю х дорівнює $x_c = 0$. Для осі у маємо:

$$y_c = \frac{S_d y_d - S_{сег} y_{сег} - S_e y_e}{S_d - S_{сег} - S_e}, \quad (2.14)$$

Показники, потрібні для розрахунку y_c , подані в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Показники для розрахунку центра мас шару компонента в корпусі дозатора

	Корпус дозатора	Сегмент	Вал шнека
Координата центра мас за у	0	$\frac{4 \sin^3 \left(\frac{\alpha}{2}\right)}{3(\alpha - \sin \alpha)} R_d$	0
Площа фігури S	πR_d^2	$0,5 R_d^2 (\alpha - \sin \alpha)$	πR_B^2

Прийmemo пропорційність діаметрів:

$$y_c = \frac{S_d y_d - S_{сег} y_{сег} - S_e y_e}{S_d - S_{сег} - S_e} = - \frac{4 R_d \sin^3(\alpha / 2)}{3 \sin \alpha + [(6 - 6k^2)\pi - 3\alpha]}, \quad (2.15)$$

Таким чином маємо рівняння з невідомим центральним кутом α .

Визначення центрального кута сегмента. Запишемо частку заповнення поперечного перерізу шнека компонентом та спростимо:

$$\psi = 1 - \frac{S_B + S_{сег}}{S_d} = 1 - \frac{\pi k^2 + 0,5 (\alpha - \sin \alpha)}{\pi}. \quad (2.16)$$

Отже, маємо систему, розв'язок якої дозволяє обчислити положення центра мас шару залежно від геометричних параметрів та частки заповнення:

$$\begin{cases} y_c = -\frac{(4R \sin^3(\frac{\alpha}{2}))}{3 \sin \alpha + [(6 - 6k^2)\pi - 3\alpha]}, \\ \psi = 1 - \frac{\pi k^2 + 0,5(\alpha - \sin \alpha)}{\pi}. \end{cases} \quad (2.16)$$

Тоді відстань від точки центра мас шару у поперечному перерізі шнека до нижньої точки корпусу дозатора (рисунок 2.7) визначається як:

$$\hat{z}_c = R_d - |y_c|. \quad (2.17)$$

З огляду на безперервність потоку частинок, які у момент спрацювання датчика та початку гальмування шнека ще не досягли приймальної площадки, частина матеріалу залишається в повітрі й не впливає на ваговимірювальний сигнал, збільшуючи похибку дозування. Стовп матеріалу у падінні має висоту h_p . Тоді масу, що перебуває у вільному падінні, подамо як функцію від продуктивності шнека:

$$M_n = Qt_{п.розр.}, \quad (2.18)$$

За виразом (2.18) будується поверхня, що відображає залежність кількості сипкого компонента, який перебуває у вільному падінні, від часу падіння та подачі. Подача Q входить у пряму пропорційну залежність: із зростанням одного з факторів вплив другого на оцінюваний критерій посилюється.

Виконаємо аналіз впливу подачі та висоти падіння на масу компонента у вільному падінні.

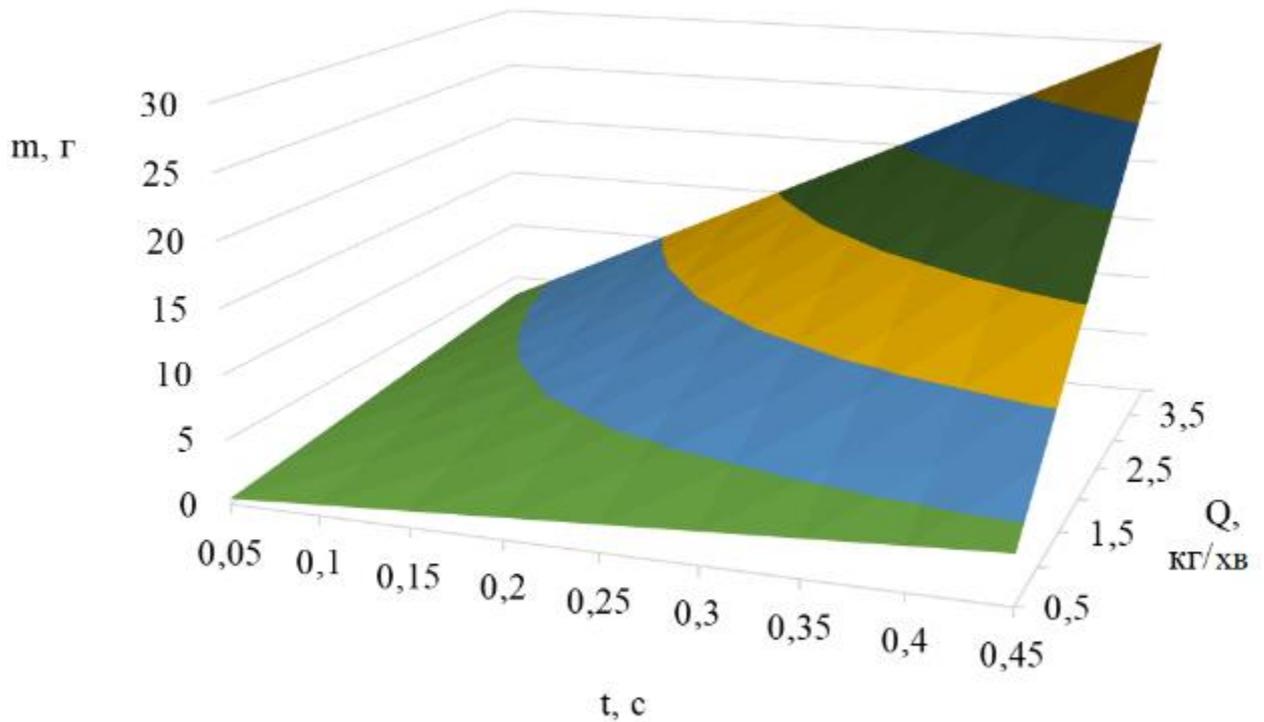


Рисунок 2.9 – Залежність кількості сипкого компонента, що перебуває у вільному падінні, від часу падіння та подачі

Для цього підставимо рівняння (2.15) для встановлення коефіцієнта аеродинамічного опору у вираз (2.18), виконаємо перетворення та отримаємо залежність для висоти падіння поданого компонента:

$$z = \frac{v_{\text{вум}}^2}{2g} \left(e^{-\frac{g}{v_{\text{вум}}} t_{\text{п.розр.}}} - 1 \right) + v_{\text{вум}} t_{\text{п.розр.}}, \quad (2.19)$$

Рівняння (2.19) встановлює зв'язок між висотою та часом падіння частинок.

У результаті спільного використання (2.13) і (2.19) отримують графіки, що характеризують зміну маси матеріалу у вільному падінні залежно від подачі та висоти падіння (рисунок 2.10). Як приклад розглянуто дозування солі

як одного з найважчих і «складних» у дозуванні матеріалів; швидкість витання прийнято $v_{(ВИТ)} = 9,8$ м/с.

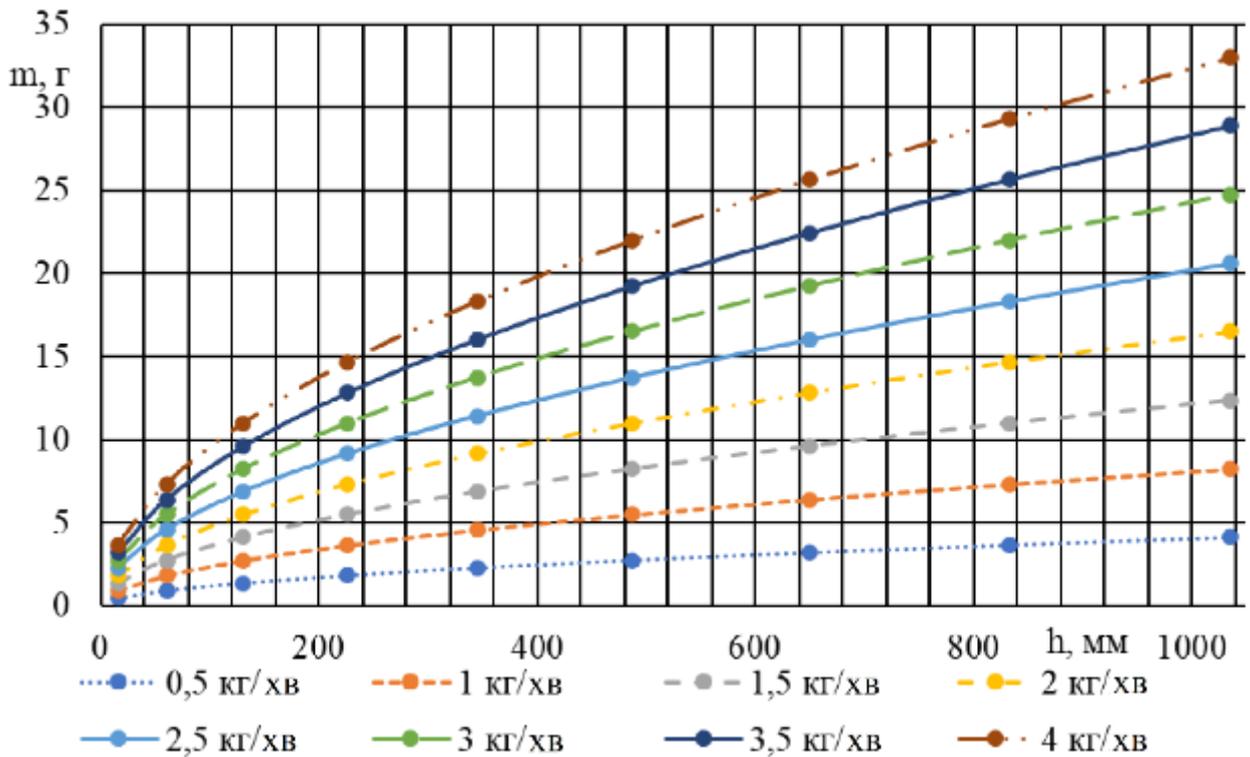


Рисунок 2.10 – Вплив подачі та висоти падіння компонента на масу у вільному падінні

За графіками видно: що вища висота падіння, то більша маса компонента у падінні (експоненційна залежність). Графіки дають змогу визначити масу компонента у вільному падінні за заданих z і Q . Наприклад, за висоти бункера механізму зважування 1 м у програму керування доцільно вводити поправку ≈ 33 г при подачі 4 кг/хв та ≈ 29 г при 3,5 кг/хв тощо.

Далі врахуємо, що рецептура комбікормів містить компоненти з різними швидкостями витання. Проаналізуємо вплив $v_{(ВИТ)}$ (що характеризує тип матеріалу) і висоти падіння на масу у вільному падінні за сталої подачі $Q = 0,8$ кг/хв (рисунок 2.11). За побудованим графіком можна визначити різницю у масі для матеріалів за однакової висоти падіння: наприклад, за $z = 200$ мм маса при

$v_{(вит)} = 1$ м/с становить $\approx 4,4$ г, а при $v_{(вит)} = 9$ м/с - $\approx 2,7$ г; за $z = 400$ мм - $\approx 8,3$ г і $\approx 4,4$ г відповідно.

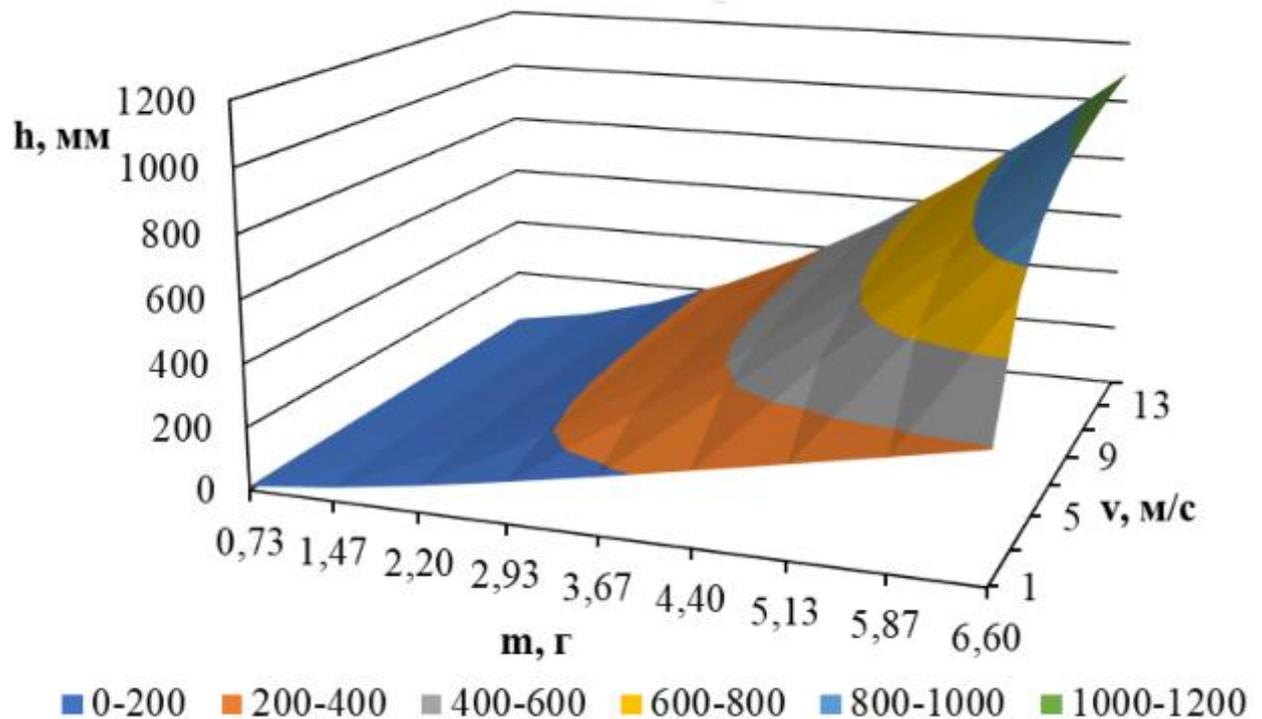


Рисунок 2.11 – Залежність висоти стовпа падіння від швидкості витання компонента та маси компонента у вільному падінні за $Q = 0,8$ кг/хв

Щоб оцінити загальну масу, що визначає похибку дозування, слід спільно використовувати графіки з рисунків 2.6, а та 2.11. Наприклад, швидкість витання крейди та солі відрізняється у вісім разів, а густина - у два. За частоти обертання шнека $n = 18,7$ хв⁻¹ і висоти бункера 1 м маса крейди у падінні становить $\approx 13,2$ г, а солі - $\approx 6,6$ г; додатково під час гальмування шнека буде переміщено $\approx 3,2$ г крейди та $\approx 6,3$ г солі. Отже, після спрацювання датчика сумарно додається $\approx 16,4$ г крейди та $\approx 12,9$ г солі.

2.4 Висновки за розділом

1. Зупинка вала шнека з асинхронним приводом після подачі сигналу «стоп» відбувається поступово, що підвищує фактичну масу навішування.

2. Отримано залежності для розрахунку маси в режимі гальмування та маси у вільному падінні - складові сумарної похибки дозування.

3. Маса, транспортована у гальмуванні, прямо пропорційна частоті обертання та подачі.

4. Для шнека ДШ-60 мінімальні теоретичні величини: $\approx 16,4$ г - для крейди, $\approx 12,9$ г - для солі.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДОЗУВАННЯ КОМБІКОРМІВ

3.1 Програма експериментальних досліджень

Програму експериментальних досліджень роботи дозувального пристрою сформовано відповідно до поставлених завдань і структуровано у такі послідовні етапи оцінювання:

1. Перевірка точності дозування сухого компонента комбікорму під час роботи пристрою з асинхронним та кроковим електроприводами.
2. Дослідження впливу асинхронного й крокового електроприводів на точність дозування сипких компонентів у режимі дозування двома шнеками.

3.2 Лабораторна установка

У запропонованому дозувальному пристрої шнеки розташовано один над одним у спільному корпусі, що зменшує габарити та собівартість конструкції. Для проведення експериментів лабораторні дозувальні вузли (шнеки) виготовляли як окремі модулі - це спростило спостереження за зміною дослідних параметрів, фіксацію перебігу процесу та подальшу обробку результатів.

На першому етапі досліджень лабораторна установка (рисунок 3.1) складалася з рами з інтегрованими тензодатчиками, на які спирається приймальний майданчик, та двох окремо встановлених металевих стояків із завантажувальними бункерами. У бункерах розміщено шнеки з різними конструктивними параметрами, з'єднані через редуктори з електроприводами. Систему керування дозатором змонтовано в електрошкафі з сенсорним дисплеєм. За результатами аналізу наявних програм керування дозувальним обладнанням встановлено, що більшість із них вузькоспеціалізовані та частково не враховують важливі чинники похибки дозування. Тому для оперативного керування процесом і підвищення точності було розроблено спеціальне програмне забезпечення з урахуванням особливості конструкції (наявність двох робочих органів

- шнеків). Технологічні параметри та склад компонентів задавали через сенсорний панельний інтерфейс Schneider (рисунок 3.2).



Рисунок 3.1 – Загальний вигляд установки



Рисунок 3.2 – Загальний вигляд завантажувальних бункерів зі вбудованими шнеками: а – шнек ДШ-120; б – шнек ДШ-60.

Шнек ДШ-60 мав такі конструктивні характеристики: зовнішній діаметр (по дотичній до спіралі) - 53 мм, висота пера спіралі - 11 мм, крок витків - 24 мм, внутрішній діаметр кожуха - 60 мм. Шнек ДШ-120: зовнішній діаметр (по дотичній до спіралі) - 116 мм, висота пера - 38 мм, крок витків - 115 мм, внутрішній діаметр кожуха - 120 мм (рисунок 3.2).

3.3 Методика визначення похибки дозування пристрою

Досліджувалось, як маса навішування, а також початкова й кінцева частоти обертання шнека впливають на точність дозування за інших рівних умов. Мета - обчислити мінімально можливу масу порції, яку можна надійно зважити встановленим шнеком.

Послідовність лабораторних випробувань. Сипкий компонент вручну засипали у приймальний бункер. На шафі керування Schneider із сенсорним планшетом задавали технологічні параметри: уставку частоти шнека (Гц), уставку частоти «досипки» шнеком (Гц), уставку упередження досипки (кг), а також затримку між етапами засипання (с). Після запуску програми на електропривод подавалася напруга, через редуктор обертання передавалося на шнек, який транспортував матеріал до розвантажувального патрубку. Для зважування навішування матеріал подавався у контрольну ємність на приймальному майданчику, обладнаному тензодатчиками. За досягнення заданої маси сигнал із тензодатчиків надходив до системи керування, напруга з електропривода знімалася, процес зупинявся. Значення маси відображалось на моніторі та фіксувалося у журналі. Далі цикл повторювали.

Об'єкт і умови оцінки точності.

Оцінювання точності проводили для одного компонента - подрібненого зерна. Маса навішування змінювалася від 0,050 кг, а далі 0,10; 0,20; 0,30 кг. Частоту обертання шнека послідовно змінювали від 12 до 24 Гц із кроком 1 Гц за незмінних значень: уставки частоти «досипки», уставки упередження досипки та затримки між етапами засипання.

Технологічні параметри, встановлені у програмі (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 - Технологічні параметри

№ до- сліду	Уставка частоти обертання шнека, Гц	Уставка час- тоти «доси- пки», Гц	Уставка упере- дження досипки, кг	Затримка між ета- пами, с
1–13	12–24	5	0,03	5

3.4 Результати досліджень робочого процесу дозатора

Відповідно до програми досліджень на першому етапі виконали однофакторні експерименти, метою яких було визначення мінімальної частоти обертання шнека та маси навішування, що досягається під час дозування на пристрої з асинхронним приводом при використанні шнека ДШ-60.

Аналіз отриманих результатів наочно демонструє вплив маси навішування на точність дозування сипких компонентів (рисунок 3.3). Початкова частота обертання вала особливо суттєво впливає на навішування масою до 100 г. Подальше збільшення маси навішування поступово зменшує вплив частоти обертання, і вже за маси $m = 300$ г частота шнека фактично не впливає на точність дозування. Водночас для навішування 200 г у діапазоні 14–19 Гц спостерігається більш помірною характеристика; поза цим діапазоном відмічають різкі коливання і зниження точності. На ділянці частоти $n = 13,5–14$ Гц за маси 50 г точність є допустимою; зі збільшенням маси до 100 г «робоча» ділянка розширюється до 15,5–19 Гц. З урахуванням помірності кривих і можливості корекції відхилень по осі ординат (через налаштування упередження досипки в програмі керування) рекомендовано масу навішування не менше 100 г.

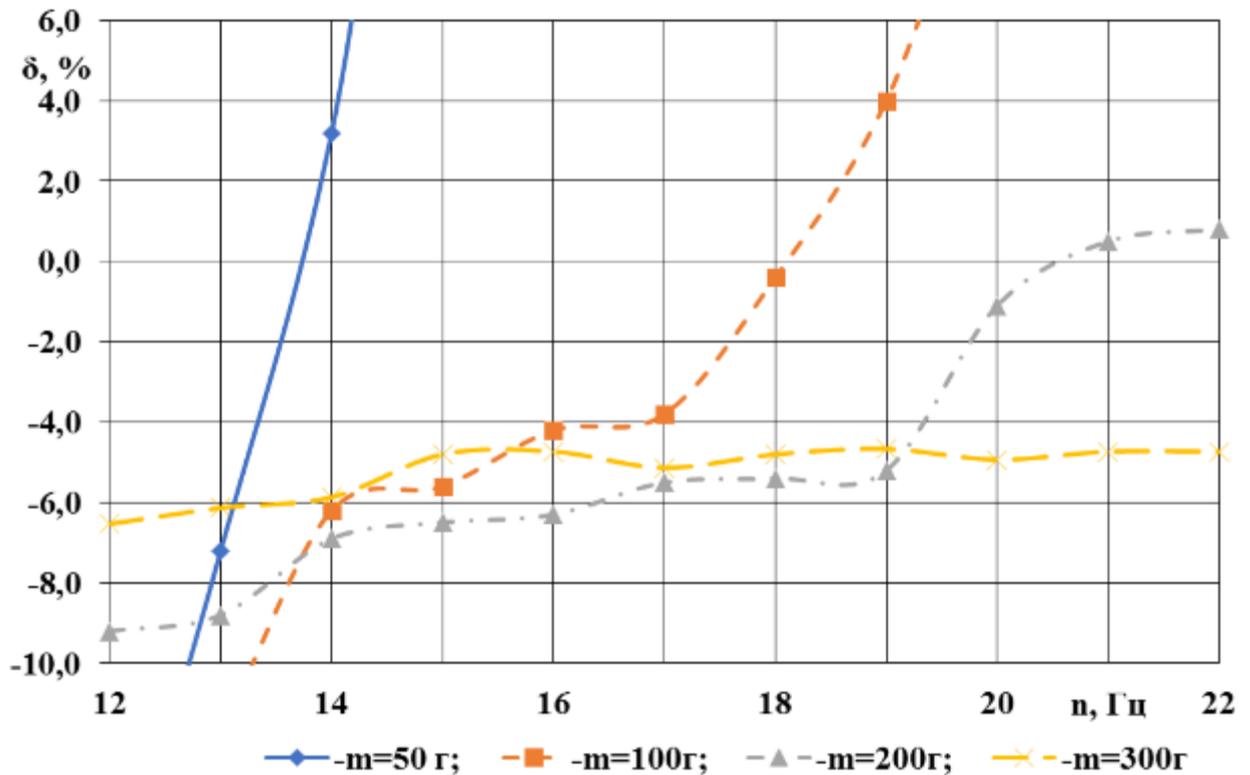


Рисунок 3.3 – Вплив маси навішування та частоти обертання шнека на точність дозування подрібненого зерна.

Суттєвим недоліком асинхронного електропривода в цьому випадку є швидке зниження крутного моменту й неможливість обертання шнека під навантаженням на низьких частотах струму. Отже, частота «досипки» звужує робочий діапазон і змушує коригувати роботу дозатора шляхом внесення поправок до інших параметрів. Тому подальші дослідження доцільно проводити за частоти досипки понад 5 Гц.

На другому етапі вивчали вплив сукупності факторів:

- n_1 - уставка частоти дозаторів, Гц;
- m - уставка упередження досипки, г/кг (або кг за контекстом);
- t - уставка ввімкнення швидкості досипки, %;
- n_2 - уставка частоти дозаторів у % від n_1 , Гц;
- M_r - задана маса порції (за рецептурою).

Застосовано план Бокса-Бенкіна для 5 факторів (Додаток Г). Інтервали варіювання частоти змінювали від 30 до 50 Гц. Інші параметри: уставка «досипки» - 30, 80 та 130 г; уставка ввімкнення швидкості досипки - 10, 50 та 90 %; уставка n_2 - 40, 70 та 100 % від n_1 ; задані маси порції - 150, 350 та 550 г. Експерименти проводили на ячмені; далі - на солі та крейді.

Регресійна модель у закодованому вигляді (довірча ймовірність 95 %):

$$y = 3.736 + 11.744x_1 - 16.113x_2 + 11.106x_3 + 14.619x_4 - 12.531x_5 - 8.85x_1x_5 + 13.375x_2x_5 + 8.073x_3^2 - 8.575x_3x_4 - 12.1x_3x_5 + 9.289x_4^2 + 8.805x_5^2, \quad (3.1)$$

Адекватність моделі підтверджує високе $R^2 = 93,4212$ %. За Парето-діаграмою найвпливовішим є фактор x_2 : за зростання m похибка зменшується. Критерій Дарбіна-Вотсона $DW = 2,47$ свідчить про відсутність суттєвої автокореляції залишків (5 %).

Модель у розкодованому вигляді:

$$\delta = -29.35 + 2.72n_1 - 0.79m + 0.80t - 0.60n_2 - 0.07M_z - 0.004n_1M_z + 0.001mM_z + 0.005t^2 - 0.007tn_2 - 0.002tM_z + 0.01n_2^2 + 0.0002M_z^2, \quad (3.2)$$

Таблиця 3.2 – Оптимальні комбінації факторів під час дозування ячменю

Показник	№1	№2	№3
n_1 , Гц	39,9	31,4	30,3
m , г	83,5	34,8	31,8
t , %	49,0	44,6	11,9
n_2 , % від n_1	66,1	59,2	40,9
M_r , г	359,8	384,5	202,8

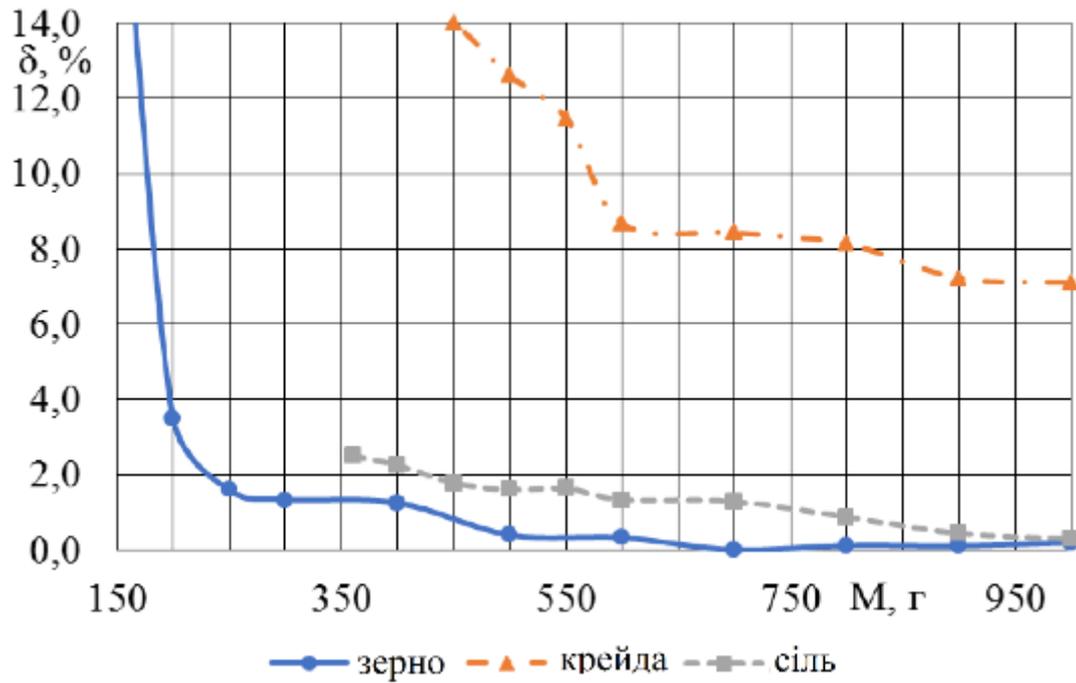


Рисунок 3.4 – Вплив маси навішування на точність дозування за $n_1 = 39,9$ Гц, $t = 49,0$ %; $n_2 = 66,1$ % від n_1 (26,4 Гц), $m = 83,5$ г.

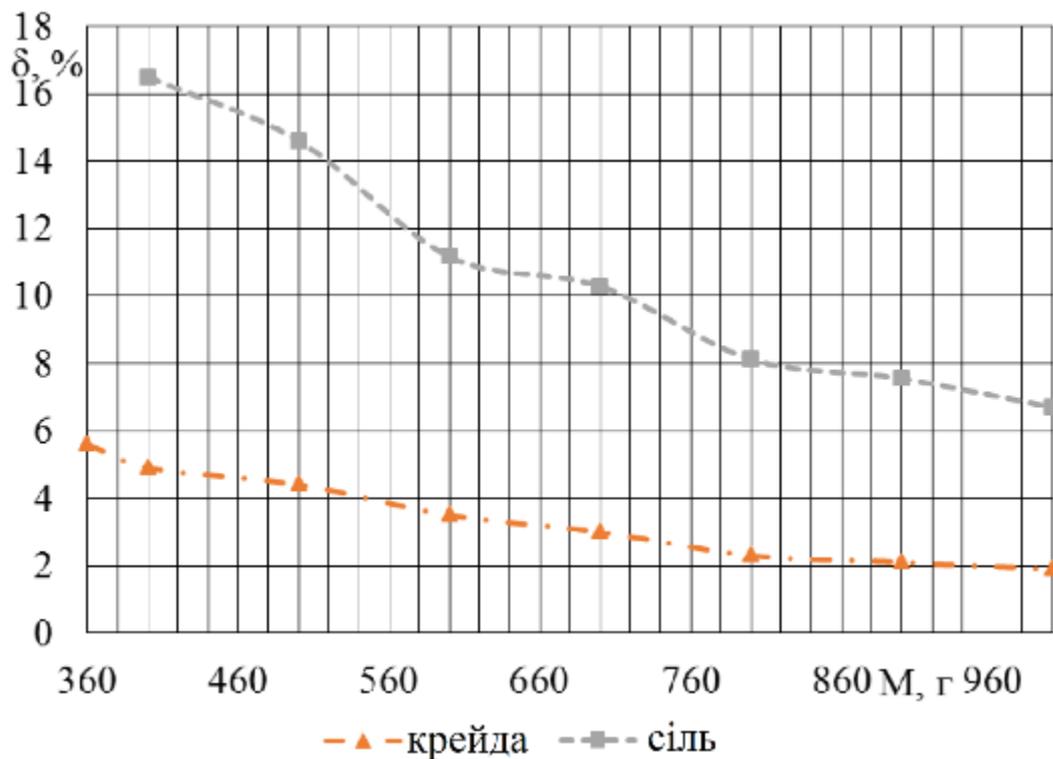


Рисунок 3.5 – Вплив маси навішування на точність дозування за $n_1 = 39,9$ Гц, $t = 49,0$ %; $n_2 = 66,1$ % від n_1 (26,4 Гц), $m = 30$ г.

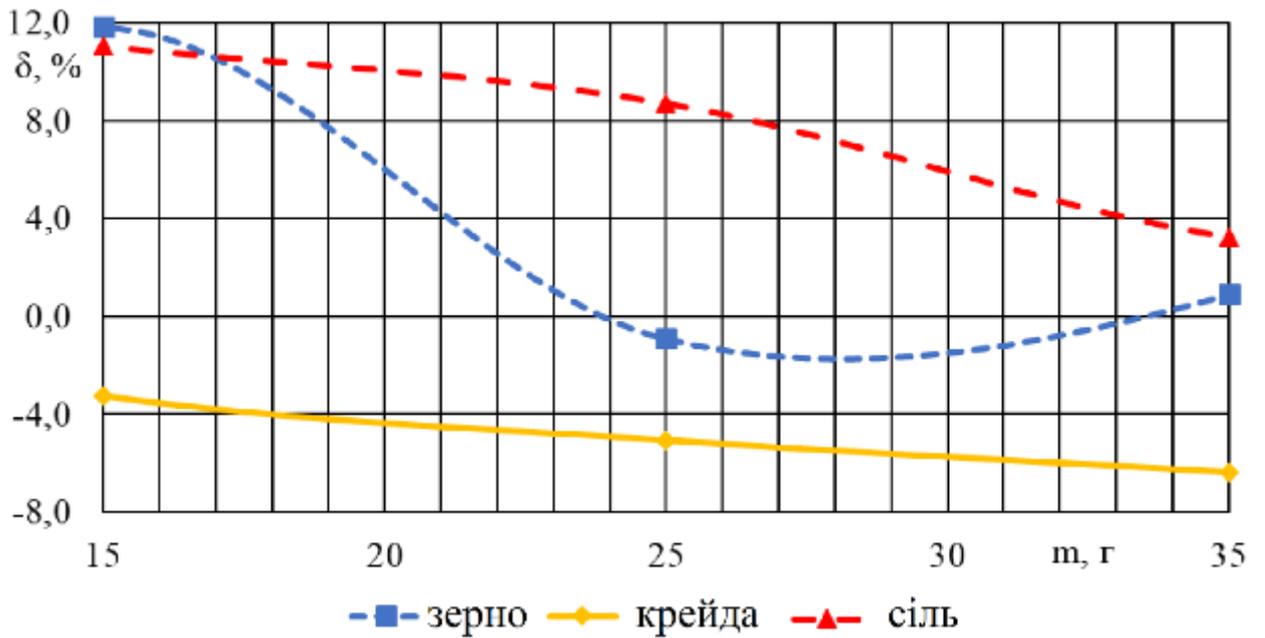


Рисунок 3.6 – Вплив уставки упередження досипки m на точність дозування за $n_1 = 31,4$ Гц, $t = 44,6587$ %; $n_2 = 59,2$ % від n_1 (18,6 Гц), $MZ = 384,5$ г.

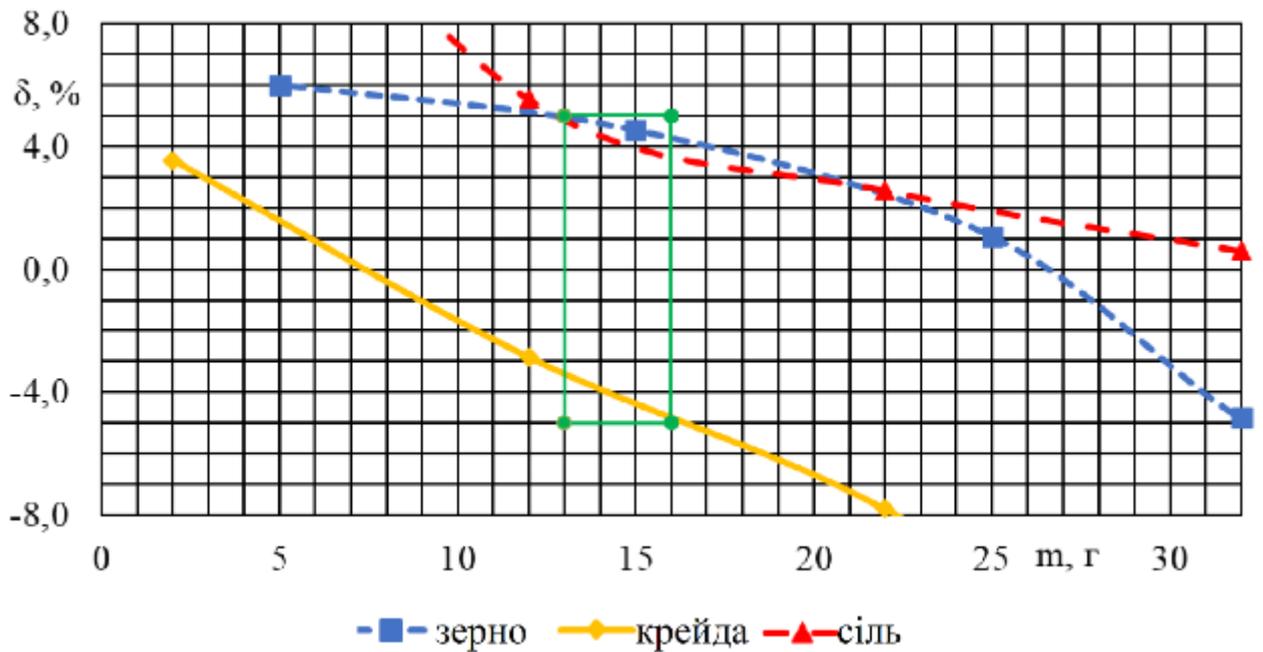


Рисунок 3.7 – Вплив уставки упередження досипки m на точність дозування за $n_1 = 30,3$ Гц, $t = 11,9$ %; $n_2 = 40,9$ % від n_1 (12,42 Гц), $MZ = 202,8$ г.

Оптимальна комбінація факторів, за якої похибка дозування зерна, солі й крейди не перевищує допустиме значення: $n_1 = 30,3$ Гц, $t = 11,9$ %, $n_2 = 40,9$ % від n_1 (12,42 Гц), $M_Z = 202,8$ г. За цих налаштувань дозування порцій понад 200 г забезпечує допустиму похибку; можливе коректне дозування інших компонентів з подібною насипною густиною ($\approx 0,6-1,2$ г/см³).

3.5 Висновки з розділу

1. Програму та стенд сформовано коректно: модульна конструкція (два окремі шнеки) і власне ПЗ забезпечили стабільні умови та репродукованість вимірювань. Мінімальна доцільна маса навішування для асинхронного привода - ≥ 100 г: за менших мас початкова частота сильніше впливає на похибку.
2. Для навішування 200 г «робоче вікно» точного дозування - 14–19 Гц; поза ним спостерігаються коливання та зростання похибки. Асинхронний електропривод обмежує точність на низьких частотах через падіння крутного моменту; частоту «досипки» доцільно тримати > 5 Гц.
3. Багатофакторний план (Бокс-Бенкін) підтвердив адекватність регресійної моделі ($R^2 \approx 93,4\%$, $DW \approx 2,47$) і виділив найвпливовіший фактор - уставку упередження досипки m (зростання m зменшує похибку). Комбінація №1 параметрів придатна для зерна та солі, але не забезпечує допустиму похибку для крейди; зменшення m до 30 г частково покращує ситуацію, та універсальності не дає. Комбінація №2 також не гарантує прийнятної точності для всіх матеріалів у досліджених межах. Комбінація №3 ($n_1=30,3$ Гц; $t=11,9\%$; $n_2=40,9\%$ від n_1 ($\approx 12,42$ Гц); $M_Z=202,8$ г) забезпечує допустиму похибку для зерна, солі та крейди; узгодження з теорією - $\sim 98,98\%$.
4. Допустиму точність можна узагальнювати на інші інгредієнти з насипною густиною $\sim 0,6-1,2$ г/см³, за умови збереження знайдених налаштувань і мас

навішування >200 г. Практичний висновок: для асинхронного привода калібрування m («упередження»), вибір n_1/n_2 і маси навішування є ключовими важелями зниження похибки; оптимальна стратегія - двоступенева подача з раннім переходом на «досипку» та контролем часу/частоти гальмування шнека.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Загальні вимоги охорони праці при роботі

з дозатором комбікормів

Експлуатація дозатора допускається лише персоналом, що пройшов медичні огляди, навчання та перевірку знань з охорони праці, пожежної та електробезпеки, а також первинний і повторні інструктажі відповідно до вимог законодавства України про охорону праці та підзаконних актів. Робото- та вибухонебезпечні частини машини (шнеки, муфти, ремені, редуктори) повинні бути закриті стаціонарними огороженнями з міжблокуванням, а органи аварійної зупинки мають бути розміщені у зоні досяжності оператора та відповідати вимогам до функцій аварійної зупинки. Електрообладнання повинне мати справні засоби захисту від ураження електричним струмом, коротких замикань і струмів витоку, виконане зі ступенем захисту, адекватним запиленому середовищу, з перевіреним контуром заземлення і протоколами вимірювань. Виробничі приміщення оснащуються ефективною місцевою та загальнообмінною вентиляцією, що забезпечує видалення пилу, а також нормованою освітленістю без стробоскопічного ефекту біля обертових частин; рівні шуму та вібрації контролюються і за потреби знижуються до нормативів шляхом застосування шумоглушників, вібропідвісів і антивіброопор. Система пожежної безпеки включає первинні засоби пожежогасіння, заземлення та зрівнювання потенціалів, антистатичні рукави й клейки на пневмотранспорті, а в пилонебезпечних зонах - вибухозахисні технічні рішення (вибухові скидні панелі або активна супресія), що узгоджуються з категоріюванням приміщень та класифікацією зон. Перед кожним пуском оператор здійснює зовнішній огляд, перевіряє цілісність огорожень і блокувань, відсутність сторонніх предметів у

бункерах, справність аспірації, індикаторів та сигналізації. Забороняється працювати з відкритими кожухами, обминати міжблокування, виконувати чистку, регулювання або змащування механізмів під час руху, а також змінювати технологічні параметри ПЛК без дозволу відповідальної особи. Застосування засобів індивідуального захисту є обов'язковим: захисні окуляри або щиток, фільтрувальний респіратор не нижче FFP2–FFP3 за пилу, рукавиці, спецвзуття із захисним підноском, за потреби антистатичний одяг у вибухонебезпечних зонах (Закон України «Про охорону праці»; ДСТУ EN ISO 12100; ДСТУ EN 60204-1; ДСТУ EN ISO 13850; ДСТУ EN ISO 14119; НАПБ А.01.001 «Правила пожежної безпеки в Україні»; Кодекс цивільного захисту України; ДСТУ EN 149; ДСТУ EN 12464-1; ДСН з шуму та вібрації).

4.2 Оцінка небезпечних факторів з точки зору охорони праці при експлуатації дозатора

Найсуттєвішими ризиками є механічні травмування (затягування у зонах шнеків, муфт, ременів, порізи кромками), електротравми у запиленому середовищі, пилова пожежо- та вибухонебезпека, підвищені рівні шуму, вібрації та запиленості повітря, а також ергономічні навантаження при завантаженні сировини і ризики ковзання/падіння. Їх зниження досягається конструктивними і організаційними заходами: суцільними огороженнями з міжблокуванням відповідно до вимог щодо відстаней безпеки, штатними аварійними вимикачами, регламентними вимірюваннями опору ізоляції та параметрів заземлення, застосуванням локальної аспірації у місцях утворення пилу з уловлюванням і утилізацією, регулярним сухим прибиранням промисловими пилососами, температурним моніторингом підшипників і редукторів, антистатичними матеріалами та вирівнюванням потенціалів у пневмотранспорті. Для ви-

ключення несанкціонованого доступу до джерел енергії під час обслуговування впроваджується процедура запобігання несподіваному пуску (енергоблокування/маркування), що передбачає відключення і фіксацію джерел електричної та пневматичної енергії, розсіювання залишкових енергій, перевірку відсутності напруги та інерційного ходу і поновлення огорожень перед пуском. У разі місткоутворення або злежування матеріалу у бункері очищення здійснюється лише після повної зупинки та енергоблокування із застосуванням спеціальних штовхачів або вібраторів, без ручного втручання зверху; для профілактики встановлюються ворошители, вібратори або пневмоімпульсні системи. Подачу і транспортування сировини доцільно механізувати (транспортери, підйомники) з метою зниження ручного підймання, а підлоги утримувати сухими і неслизькими, забезпечивши порядок і чистоту робочих місць (5S). Вимоги до оцінки ризиків, огорожень, інтерлоків, вибухозахисту та класифікації зон визначаються гармонізованими стандартами та національними правилами (ДСТУ EN ISO 12100; ДСТУ EN 13857; ДСТУ EN ISO 14119; ДСТУ EN ISO 14118; ДСТУ EN 1127-1 «Вибухонебезпечні середовища»; ДСТУ EN 60079-10-2 «Класифікація зон. Пил»; НАПБ А.01.001; ПТЕЕС/ПБЕЕС; ДСТУ EN 149; ДСН 3.3.6.037-99 «Шум»; ДСН 3.3.6.039-99 «Вібрація»; ДСТУ EN 12464-1 «Освітлення робочих місць у приміщеннях»).

4.3 Порядок дій під ракетного обстрілу

У разі оголошення повітряної тривоги або отримання повідомлення про ракетну загрозу оператор негайно припиняє подачу сировини, зупиняє обладнання штатним «СТОП», після чого за можливості переводить систему у безпечний стан: відключає живлення головних приводів, контрольовано зупиняє аспірацію без створення умов для вторинного виносу пилу, перекриває подачу стисненого повітря, фіксує положення запірної арматури. За наявності часу

виконується короткий обхід візуального контролю на відсутність ознак займання, перегріву або аварійних витоків; після цього персонал організовано прямує до найближчого укриття, дотримуючись визначених маршрутів, уникаючи зон біля світлопрорізів і металоконструкцій. В укритті підтримується зв'язок із відповідальною особою, фіксується чисельність працівників. Повернення до робочого місця здійснюється лише після офіційного відбою тривоги; перед запуском проводиться позачерговий огляд устаткування на предмет пошкоджень, розгерметизації повітроводів і накопичення пилу, виконуються пробні пуски у холостому режимі та перевіряються функції безпеки. Вимоги щодо організації оповіщення, евакуації та дій персоналу визначаються планами цивільного захисту об'єкта і законодавством у сфері цивільного захисту (Кодекс цивільного захисту України; локальний План реагування/План евакуації, НАПБ А.01.001).

4.4 Висновки з розділу

Безпечна експлуатація дозатора комбікормів забезпечується поєднанням технічних, організаційних і процедурних рішень: підготовленим персоналом, справними огороженнями з міжблокуванням, функціональними аварійними зупинками, електробезпекою та вибухопожежною профілактикою, ефективною аспірацією і нормованим виробничим середовищем, системним застосуванням засобів індивідуального захисту та обов'язковою процедурою запобігання несподіваному пуску під час обслуговування. Дотримання вимог гармонізованих стандартів і національних правил, а також наявність чіткого алгоритму дій у разі ракетної загрози дозволяють знизити виробничі ризики, попередити травматизм і забезпечити стійку, безпечну роботу дозувальної лінії.

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ДОЗАТОРА

5.1 Вихідні дані

Для порівняння попереднього дозування зернової складової комбікормів для свиней розглянуто два технічні рішення - базовий (стандартний) та удосконалений дозатори. Порівняння виконується за однакового річного обсягу робіт і однакової організації зміни.

Кількість дозаторів на лінії: 2 од. (в обох варіантах).

Продуктивність: стандартний - 10 т/год; удосконалений - 8...10 т/год (забезпечує необхідний річний обсяг).

Встановлена потужність (на комплект із 2 од.): стандартний - 5,6 кВт (2,8×2), удосконалений - 4,4 кВт (2,2×2).

Персонал обслуговування: 1 працівник (в обох варіантах).

Витрати праці на зміну подачі: стандартний - 0,4 люд.-год/зм, удосконалений - 0,1 люд.-год/зм.

Орієнтовна вартість дозатора: стандартний - 12 560 грн/од.; удосконалений - 13 240 грн/од.

Вартість комплекту (2 од.): стандартний - 25 120 грн, удосконалений - 26 480 грн.

Час роботи обладнання на добу: 8 год (обидва варіанти).

Річний обсяг робіт (на лінію): 20 940 т (для обох варіантів).

5.2 Розрахунок показників економічної ефективності

Порівняння здійснюється за річними експлуатаційними витратами (С) з поділом на складові (оплата праці, ремонт і ТО, амортизація, енергоресурси)

та за питомими витратами на 1 т продукції. Інтегральні показники: річна економія ΔC і строк окупності додаткових інвестицій $T_{\text{pay}} = \Delta K / \Delta C$, де ΔK - різниця інвестицій.

Таблиця 5.1 - Показники економічної ефективності
удосконаленого дозатора

Показник	Базовий	Проектний
Річна продуктивність, т	20 940	20 940
К-ть обслуговуючого персоналу, осіб	1	1
Встановлена потужність комплекту, кВт	5,6	4,4
Час роботи на добу, год	8	8
Вартість комплекту, грн	25 120	26 480
Додаткові капвкладення, грн	-	1 360
Експлуатаційні витрати, грн/рік	18 839,74	13 911,13
- оплата праці	4 559,10	1 139,77
- ремонт і ТО	2 763,20	2 912,80
- амортизація	3 014,40	3 177,60
- енергоресурси	8 503,04	6 680,96
Річна економія, грн	-	4 928,61
Строк окупності, років	-	0,28

Додаткові похідні показники (на 1 т продукції)

Питомі експлуатаційні витрати, грн/т: базовий - 0,900; проектний - 0,664; економія - 0,236 грн/т.

Питома вартість енергії, грн/т: базовий - 0,406; проектний - 0,319; зменшення - 0,087 грн/т ($\approx -21,4\%$).

Питома оплата праці, грн/т: базовий - 0,218; проектний - 0,054; зменшення - $\approx -75\%$ (скорочення трудомісткості переналаштувань).

Зміна витрат на ТО та амортизацію: невелике зростання ($\sim 5,4\%$), яке не нівелює сумарної економії.

5.3 Висновки

Модернізація дозатора є економічно доцільною. За додаткових інвестицій 1 360 грн одержується річна економія 4 928,61 грн (в основному завдяки зменшенню витрат на електроенергію $\approx -21,4\%$ та праці $\approx -75\%$), що забезпечує строк окупності близько 0,28 року. Питомі експлуатаційні витрати знижуються з 0,900 до 0,664 грн/т ($-26,2\%$). Незначне зростання витрат на ТО й амортизацію компенсується енергетичною та організаційною ефективністю. За очікуваних коливань тарифів і завантаження лінії проєктний варіант зберігає перевагу, а за сценаріїв подорожчання енергії - навіть покращує показники окупності.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено огляд і класифікацію дозаторів (масові/об'ємні; дискретні/безперервні; шнекові, вібраційні, тарільчасті, барабанні, стрічкові, бункерні; гравітаційні/примусові). Обґрунтовано вибір шнекових систем для комбі-кормових ліній завдяки точності, універсальності й простоті інтеграції.

2. Виокремлено фактори точності та продуктивності: властивості матеріалу (вологість, насипна густина, фракція, кут укосу, злежуваність, адгезія, тертя, сипкість), геометрія шнека (діаметр, крок, висота пера, внутрішній діаметр кожуха, кут підйому), технологічні налаштування (n_1 , n_2 , упредження, затримки).

3. Сформовано алгоритм двоступеневого дозування («основна насипка» → «точна досипка») і правила підбору параметрів під конкретний компонент. Запропоновано двошнекову конструкцію (основний + шнек досипки з незалежними приводами), що розділяє режими продуктивності/точності та зменшує пульсації потоку наприкінці дозування. Розроблено теоретичні моделі похибки: додаткова маса під час гальмування шнека та маса у вільному падінні. Отримано закриті вирази для корекцій у ПЛК (упредження, профіль швидкості, затримки).

4. Показано, що зниження частоти на етапі «досипки» зменшує пульсації й систематичну похибку; інерційний внесок компенсується упредженням і часом гальмування.

5. Реалізовано лабораторні стенди (ДШ-60, ДШ-120), ПЛК-керування (TM241, ST), тензозважування; підтверджено, що збільшення маси навішування ≥ 100 г стабілізує точність, а за 200–300 г вплив n на відносну похибку мінімальний. За планом Бокса-Бенкіна отримано регресійні моделі; найвпливовіший фактор - упредження m ; значущі також n_1 , n_2 та їх взаємодії. Адекватність підтверджено високим R^2 та відсутністю істотної автокореляції. Валідовано оптимальні налаштування (приклад: $n_1=30,3$ Гц; $t=11,9\%$; $n_2=40,9\%$ від n_1

$\approx 12,42$ Гц; $M_r \approx 203$ г; $m = 13 \dots 16$ г), що забезпечують допускову похибку для ячменю, солі та крейди; розбіжність теорії/експерименту $\leq 1,1\%$.

6. Економічний ефект (2 дозатори, 20 940 т/рік): зниження експлуатаційних витрат на 4 928,61 грн/рік, питомих витрат - з 0,900 до 0,664 грн/т ($-26,2\%$), енерговитрат - приблизно $-21,4\%$, трудомісткості переналаштувань - $\approx -75\%$; окупність $\approx 0,28$ року.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Міністерство аграрної політики та продовольства України, & Національна академія аграрних наук України. (2018). Національний проєкт «Відроджене скотарство» (Текст, таблиці, додатки). Київ: ДІА, 44 с.
2. Державна служба статистики України. (n.d.). Офіційний сайт Державної служби статистики України. <https://www.ukrstat.gov.ua>
3. Прокопенко, О. М. (Ред.). (2024). Сільське господарство України: Статистичний збірник 2024. Київ: ДССУ, 379 с.
4. Бойко, А. І., & Новицький, А. В. (1997). Підвищення надійності кормодробарок та подрібнювачів. Механізація сільськогосподарського виробництва, III, 6–8.2.
5. Калетнік, Г. М., Кулик, М. Ф., Петриченко, В. Ф., та ін. (2007). Основи перспективних технологій виробництва продукції тваринництва (Г. М. Калетнік, М. Ф. Кулик, В. Ф. Петриченко (Ред.)). Вінниця: Енозіс. 584 с.
6. Гевко, І., Рогатинський, Р., & Дячун, А. (2012). Синтез змішувачів з гвинтовими робочими органами. Вісник ЛНАУ. Агроінженерні дослідження, (16), 237–246.
7. Nevko, R. V., & Klendiy, O. M. (2014). The investigation of the process of a screw conveyer safety device actuation. INMATEH Agricultural Engineering, 42(1), 55–60.
8. Pankiv, V. (2017). Throughput capability of the combined screw chopper conveyor. Вісник ТНТУ, 1(85), 69–79.
9. Рогатинський, Р., Гевко, І., & Рогатинська, Л. (2012). Оптимізація параметрів гвинтових транспортно-технологічних систем. Вісник ТНТУ, 1(69), 123–230.

10. Pankiv, V. R., & Tokarchuk, O. A. (2017). Investigation of constructive geometrical and filling coefficients of combined grinding screw conveyor. *INMATEH Agricultural Engineering*, 51(1), 59–68.
11. Fitzgerald, L. (1990). Winter feeding of cattle. *Biatas Tillage Farmer*, 44(9), 19–20.
12. Herlitzius, T., Becherer, U., & Teichmann, J. (2009). Messer von Feldhäckslern zum richtigen Zeitpunkt schleifen-Grundlagenuntersuchungen. *Landtechnik*, 64(2), 131–132.
13. Jurco, V. (1989). Vplyv zloženia krmnej dávky na kvalitu mlieka. *Náš Chov*, 49(2), 119–121.
14. Виговський, А. Ю., Барановський, В. М., Паньків, В. Р., & Грицай, Ю. В. (2019). Обґрунтування параметрів шнекових транспортерів-подрібнювачів коренеплодів. Київ: Аграр Медіа Груп. 300 с.
15. Грицай, Ю. В., Попович, П. В., Барановський, В. М., & Паньків, В. Р. (2018). Комбінований шнековий-транспортер подрібнювач (Патент України № 125415, u201711835).
16. Грицай, Ю. В. (2018). Математична модель функціонування завантажувального бункера транспортера-подрібнювача. Актуальні задачі сучасних технологій: тези VII МНТК молодих учених та студентів (Т.1, с. 71–72). Тернопіль: ФОП Паляниця В. А.
17. Боровик, М. В. (2018). Механізація процесів у тваринництві. Київ: Наукова думка.
18. Іванов, А. В. (2017). Технічні засоби для механізації кормозабезпечення свинарських підприємств. Харків: ХДАДТ.
19. Козлов, О. І. (2019). Технологічні процеси в комбикормовому виробництві. Київ: Техніка.
20. Павлов, О. М. (2016). Інноваційні технології в кормовиробництві. Одеса: Одеська національна академія харчових технологій.

21. Руденко, П. О. (2020). Основи автоматизації кормовиробництва в агропромисловому комплексі. Черкаси: Черкаський національний університет.
22. Савченко, О. М. (2018). Основи проектування систем дозування у кормовиробництві. Полтава: Полтавський університет економіки і торгівлі.
23. Сидоренко, В. П. (2017). Вдосконалення технологій виробництва комбікормів для великої рогатої худоби. Львів: Львівська політехніка.
24. Шевченко, В. С. (2019). Агротехнічні засоби для покращення ефективності виробництва комбікормів. Київ: Інститут аграрної економіки.

ДОДАТКИ

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем

Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів дозатора комбікорму

демонстраційний матеріал до дипломної роботи освітнього ступеня «Магістр»

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

Бурдила Владислав Вікторович

Керівник: к.т.н., доцент

Івлєв Віталій Володимирович

Дніпро 2025

Мета і задачі досліджень

Мета роботи – обґрунтувати конструкційно-технологічні параметри дозатора комбікорму, які забезпечують високу точність і рівномірність подачі за мінімальних питомих енерговитрат і стабільної роботи в умовах варіативних властивостей матеріалу.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати існуючі конструкції та принципи роботи дозаторів сипких кормів (шнекові, стрічкові, шлюзові, вагові; комбіновані схеми).
2. Визначити номенклатуру експлуатаційно значущих властивостей сумішей (насипна щільність, кут утосу, коефіцієнт тертя, вологість, гранулометрія) та їхній вплив на масову витрату.
3. Розробити математичну модель масової витрати як функції геометричних параметрів, швидкісних режимів та стану матеріалу; сформулювати критерії оптимізації (точність, рівномірність, енергоефективність, стійкість до злежування).
4. Створити експериментальну установку/стенд і програму випробувань із плануванням експерименту; виконати калібрування та регресій-ний аналіз.
6. Сформулювати рекомендації щодо вибору раціональних параметрів і режимів для різних умов експлуатації.

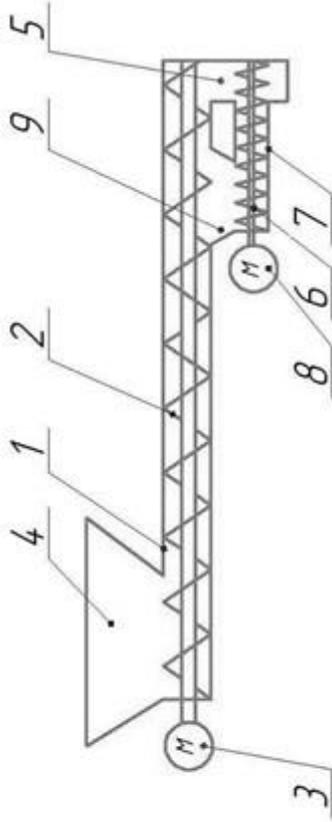


Рисунок 4 – Шнековий дозатор сухих сипких компонентів: 1 – корпус; 2 – основний шнек; 3 – електропривод; 4 – приймальний патрубок; 5 – вивантажувальний патрубок; 6 – шнек точної досіпки; 7 – корпус шнека точної досіпки; 8 – електропривод точної досіпки; 9 – завантажувальний бункер

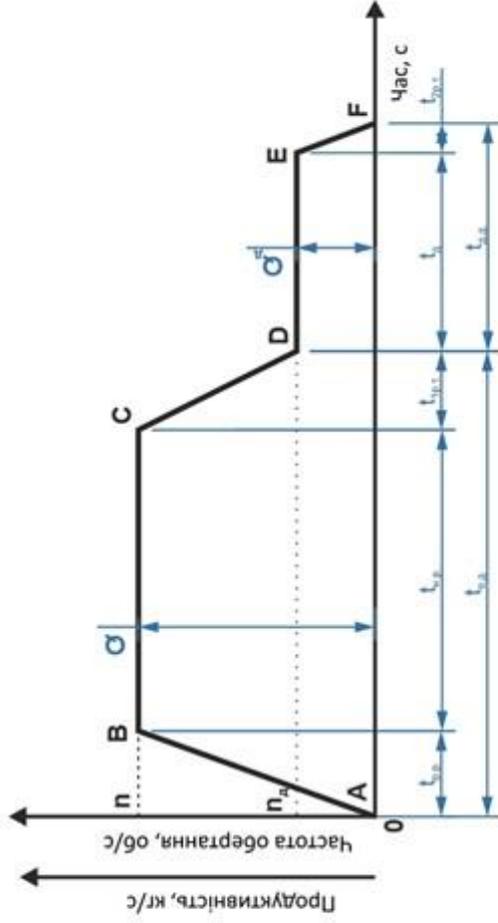


Рисунок 5 – Графік роботи шнекового дозатора, де: $t_{p.r.}$ – період режиму розгону; $t_{n.p.}$ – період роботи в номінальному режимі; $t_{1р.г.}$, $t_{2р.г.}$ – періоди режиму гальмування; t_d – період досіпки

Основна частина матеріалу подається за максимально можливої частоти обертання шнека. У цьому режимі можливий пульсаційний характер потоку матеріалу, що не гарантує сталой і рівномірної подачі.

Наприкінці дозування частота зменшується до n_d , аби знизити похибку; одночасно зменшуються і пульсації потоку.

Теоретичні дослідження

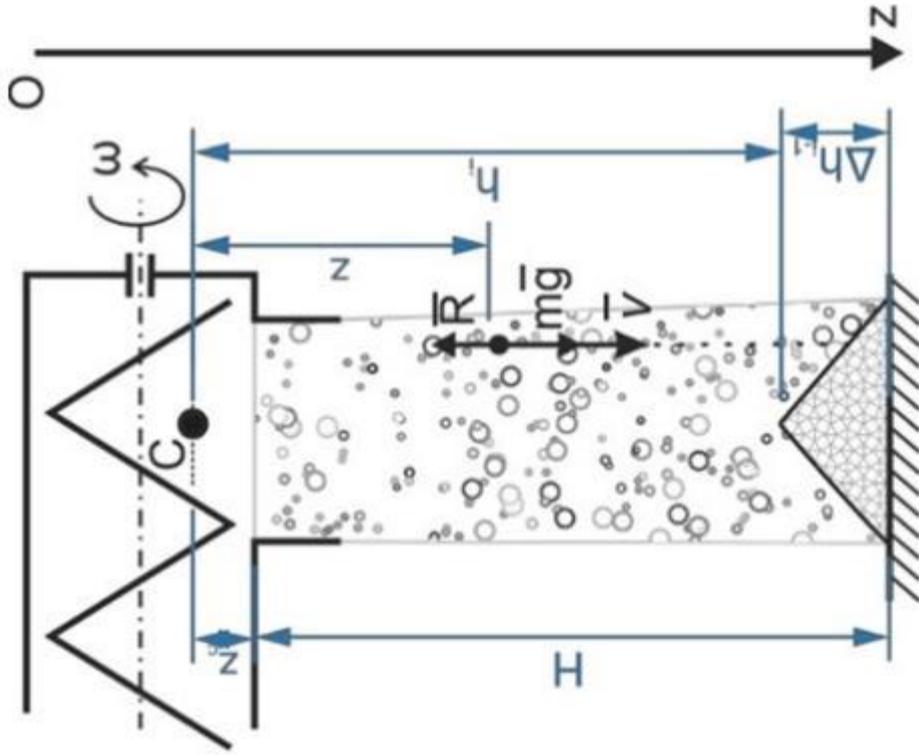


Рисунок 6 – Розрахункова модель до визначення моменту польоту елемента сипкого компонента

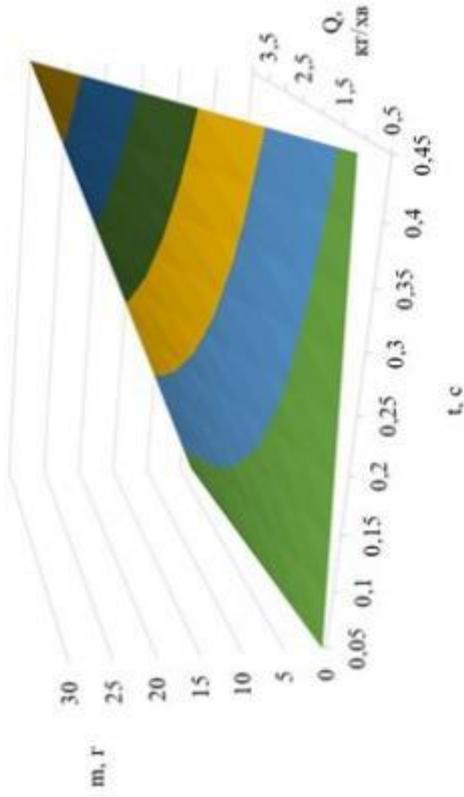


Рисунок 7 – Залежність кількості сипкого компонента, що перебуває у вільному падінні, від часу падіння та подачі

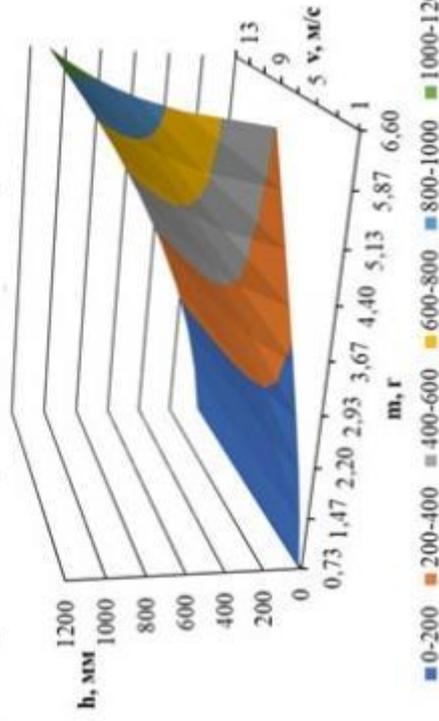


Рисунок 8 – Залежність висоти стовпа падіння від швидкості витання компонента та маси компонента у вільному падінні за $Q = 0,8 \text{ кг/хв}$

Лабораторні дослідження



Рисунок 9 – Загальний вигляд експериментальної установки

Технологічні параметри

№ досліду	Вставка частоти обертання шнека, Гц	Вставка частоти «досипки», Гц	Вставка упередження досипки, кг	Загримка між етапами, с
1-13	12-24	5	0,03	5

Лабораторні дослідження

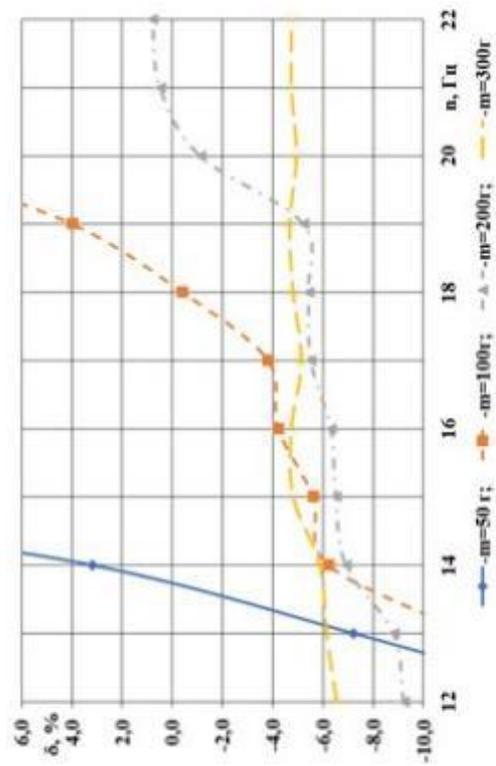


Рисунок 10 – Вплив маси навішування та частоти обертання шнека на точність дозування подрібненого зерна

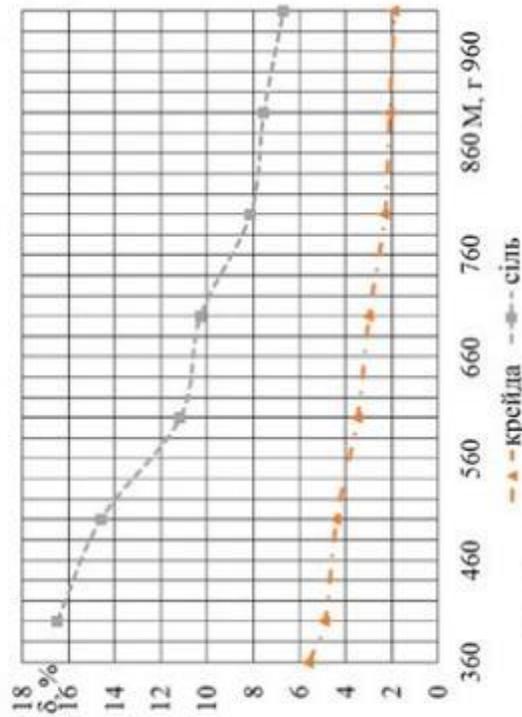


Рисунок 12 – Вплив маси навішування на точність дозування за $n_1 = 39,9$ Гц, $t = 49,0$ %; $n_2 = 66,1$ % від n_1 (26,4 Гц), $m = 30$ г.

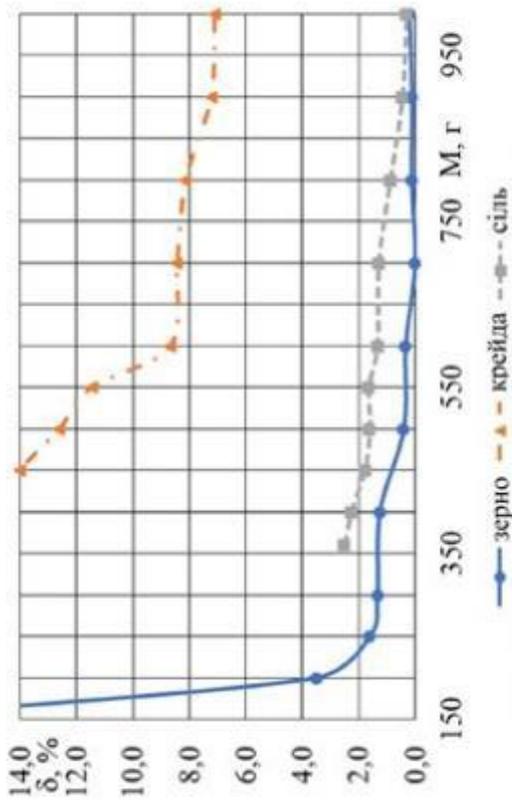


Рисунок 11 – Вплив маси навішування на точність дозування за $n_1 = 39,9$ Гц, $t = 49,0$ %; $n_2 = 66,1$ % від n_1 (26,4 Гц), $m = 83,5$ г

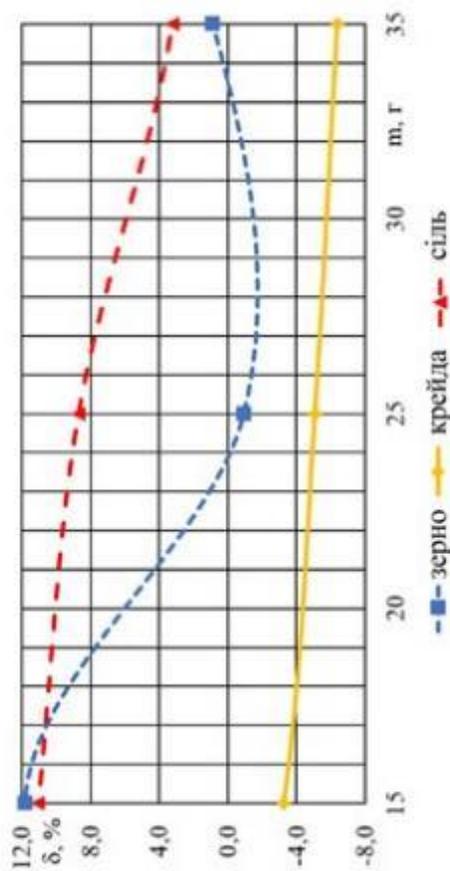


Рисунок 13 – Вплив вставки упередження дощипки m на точність дозування за $n_1 = 31,4$ Гц, $t = 44,6587$ %; $n_2 = 59,2$ % від n_1 (18,6 Гц), $MZ = 384,5$ г

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Оцінка небезпечних факторів та ризиків при експлуатації дозатора

№	Небезпечний фактор	Опис небезпечного фактора	Можливі наслідки	Оцінка ймовірності (1-5)	Оцінка тяжкості (1-5)	Оцінка ризику (1-25)	Заходи щодо мінімізації ризику
1	Механічні ушкодження під час обслуговування	Потрапляння в рухомі частини дозатора (шнеки, редуктори) під час роботи	Травмування кінцівок, порізи, здавлення	4	5	20	Використання захисних кожухів, виконання механізму перед обслуговуванням
2	Електричний шок	Потрапляння людини в контакт з електричними компонентами при пошкодженні проводки	Ожоги, електричний шок	3	5	15	Перевірка електропроводки, ізоляція, заземлення, використання автоматичних вимикачів
3	Пиллов забруднення	Викид пилу в процесі дозування комбікорму при високих швидкостях подачі	Трипація дихальних шляхів, хвороби легенів	3	3	9	Використання пилловловлювачів, систем вентиляції, індивідуальний захист органів дихання
4	Перегрів обладнання	Збільшення температури в електричних приводах і редукторах при тривалій роботі	Пожожа, пошкодження електричних компонентів	2	4	8	Моніторинг температури, регулярна перевірка охолоджувальних систем, налаштування на безперервну роботу
5	Шумове забруднення	Високий рівень шуму під час роботи механізмів дозатора	Порушення слуху, стрес, зниження продуктивності	4	3	12	Використання шумоізоляції, зниження швидкості обертання шнеків, захист органів слуху
6	Викид сировини з бункера	Переповнення або неправильне управління сировиною під час заповнення бункера	Загроза падіння, травмування персоналу	3	4	12	Використання автоматичних датчиків рівня, контроль за рівнем заповнення, встановлення обмежувачів
7	Пожежі через спалах комбікормів	Виникнення пожежі через спалах поршкоподібних компонентів комбікорму	Пошкодження обладнання, травми працівників	2	5	10	Установка автоматичних систем виявлення і гасіння пожеж, регулярні перевірки на наявність спалахів
8	Технічні неполадки механізмів	Поломка шнеків або редукторів в процесі роботи	Зупинка виробничого процесу, пошкодження обладнання	3	4	12	Регулярне технічне обслуговування, використання якісних матеріалів для виготовлення шнеків і редукторів
9	Невиправдані навантаження на дозатор	Перевантаження дозатора понад його максимальну продуктивність	Перегорання мотора, поломка механізмів	3	4	12	Встановлення обмежень на максимальне навантаження, автоматичний контроль навантаження
10	Окиснення або корозія металевих частин	Вплив вологи та корозійних агентів на металеві частини дозатора	Зниження міцності матеріалів, поломка	2	3	6	Використання антикорозійних покриттів, регулярне очищення та обробка металевих частин

Показники економічної ефективності

Показник	Базовий	Проектний
Річна продуктивність, т	20 940	20 940
К-ть обслуговуючого персоналу, осіб	1	1
Встановлена потужність комплекту, кВт	5,6	4,4
Час роботи на добу, год	8	8
Вартість комплекту, грн	25 120	26 480
Додаткові капвкладення, грн	—	1 360
Експлуатаційні витрати, грн/рік	18 839,74	13 911,13
— оплата праці	4 559,10	1 139,77
— ремонт і ТО	2 763,20	2 912,80
— амортизація	3 014,40	3 177,60
— енергоресурси	8 503,04	6 680,96
Річна економія, грн	—	4 928,61
Строк окупності, років	—	0,28

Загальні висновки

1. Проведено огляд і класифікацію дозаторів (масові/об'ємні; дискретні/безперервні; шнекові, вібраційні, тарільчасті, барабанні, стрічкові, бункерні; гравітаційні/примусові). Обґрунтовано вибір шнекових систем для комбікормових ліній завдяки точності, універсальності й простоті інтеграції.
2. Виокремлено фактори точності та продуктивності: властивості матеріалу вологість, насипна густина, фракція, кут укосу, злежуваність, адгезія, тертя, сипкість), геометрія шнека (діаметр, крок, висота пера, внутрішній діаметр кожуха, кут підйому), технологічні налаштування (n_1 , n_2 , упередження, затримки).
3. Сформовано алгоритм двоступеневого дозування («основна насипка» → «точна досипка») і правила підбору параметрів під конкретний компонент. Запропоновано двошнекову конструкцію (основний + шнек досипки з незалежними приводами), що розділяє режими продуктивності/точності та зменшує пульсації потоку наприкінці дозування. Розроблено теоретичні моделі похибки: додаткова маса під час гальмування шнека та маса у вільному падінні. Отримано закриті вирази для корекцій у ПЛК (упредження, профіль швидкості, затримки).
4. Показано, що зниження частоти на етапі «досипки» зменшує пульсації й систематичну похибку; інерційний внесок компенсується упредженням і часом гальмування.
5. Реалізовано лабораторні стенди (ДШ-60, ДШ-120), ПЛК-керування (ПМ241, ST), тензоважування; підтверджено, що збільшення маси навішування ≥ 100 г стабілізує точність, а за 200–300 г вплив n на відносну похибку мінімальний. За планом Бокса–Бенкіна отримано регресійні моделі; найвпливовіший фактор — упредження m ; значущі також n_1 , n_2 та їх взаємодії. Адекватність підтверджено високим R^2 та відсутністю істотної автокореляції. Валідовано оптимальні налаштування (приклад: $n_1=30,3$ Гц; $t=11,9\%$; $n_2=40,9\%$ від $n_1 \approx 12,42$ Гц; $M_1=203$ г; $m=13\dots 16$ г), що забезпечують допускову похибку для ячменю, солі та крейди; розбіжність теорії/експерименту $\leq 1,1\%$.
6. Економічний ефект (2 дозатори, 20 940 т/рік): зниження експлуатаційних витрат на 4 928,61 грн/рік, питомих витрат — з 0,900 до 0,664 грн/т (-26,2%), енерговитрат — приблизно -21,4%, трудомісткості переналаштувань — $\approx -75\%$; окупність $\approx 0,28$ року.