

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ**

К В А Л І Ф І К А Ц І Й Н А Р О Б О Т А

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему:

**“Дослідження конструктивних параметрів дозатора
зернової сировини”**

Виконав: студент VI курсу, групи Маш-62

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування

(шифр і назва)

Даниїл ЄРОШКІН

(Ім'я та прізвище)

Керівник: к.т.н. доцент Руслан ГУМЕНЮК

(Ім'я та прізвище)

Львів 2025

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ**

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри _____
(підпис)

д.т.н., професор Власовець В.М.
“28” лютого 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу студенту
Єрошкіну Даниїлу Юрійовичу

1. Тема роботи: **«Дослідження конструктивних параметрів дозатора зернової сировини»**

Керівник роботи: Гуменюк Руслан Васильович, к.т.н., доцент

Затверджена наказом по університету від 28.02.2025 року № 140/к-с

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 08.12.2025 року

3. Вихідні дані: Літературні джерела за тематикою кваліфікаційної роботи відомих технологічних процесів виробництва та розрахунків технологічного обладнання; Матеріали навчальної, методичної довідкової та наукової літератури; Методики визначення економічної ефективності впровадження нового технологічного рішення.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

1. Стан питання, літературно-патентний пошук;

2. Програма і методика досліджень;

3. Результати досліджень та їх аналіз;

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях;

Висновки та пропозиції;

Бібліографічний список

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

Ілюстративний матеріал представити у вигляді презентації у застосунку Microsoft PowerPoint: Мета та завдання роботи, об'єкт дослідження; Порівняльна таблиця технічних характеристик дозаторів; Огляд конструкцій дозаторів; Загальний вигляд дозатора; Бункерний дозатор сипучих матеріалів; Залежність витрати від діаметра випускного отвору; Залежність маси дози від часу дозування; Залежність продуктивності від частоти обертання приводу; Залежність похибки дозування від швидкості подачі; 3D-залежність маси дози від часу та частоти обертання; Висновки та пропозиції.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3	<i>Гуменюк Р.В., к.т.н., доц. кафедри машинобудування</i>			
4	<i>Городецький І.М., к.т.н., доцент кафедри інженерної механіки</i>			

7. Дата видачі завдання: 28.02.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1.	<i>Виконання розділу: «Стан питання, літературно-патентний пошук»</i>	28.02.25- 23.04.25	
2.	<i>Виконання другого розділу: «Програма і методика досліджень»</i>	24.04.25- 25.06.25	
3.	<i>Виконання розділу: «Результати досліджень та їх аналіз»</i>	26.06.25- 14.10.25	
4.	<i>Виконання розділу: «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»</i>	15.10.25- 24.11.25	
5.	<i>Завершення оформлення розрахунково- пояснювальної записки. Завершення роботи в цілому</i>	25.11.25- 08.12.25	

Студент _____ Даниїл СРОШКІН
(підпис)

Керівник роботи _____ Руслан ГУМЕНЮК
(підпис)

УДК 629.979

Дослідження конструктивних параметрів дозатора зернової сировини.
Єрошкін Д.Ю. Кваліфікаційна робота. Кафедра машинобудування. –
Дубляни, Львівський НУВМБТ, 2025р.

76 с. текст. част., 14 рис., 10 табл., 36 джерел інформації.

У кваліфікаційній роботі виконано удосконалення конструкції вагового бункерного дозатора зернової сировини і досліджено його робочі параметри.

Розроблена конструкція дозволяє підвищити точність дозування завдяки застосуванню тензOMETричних датчиків, оптимізації форми бункера та автоматизованому керуванню подачею матеріалу.

Проведено порівняльний аналіз існуючих дозаторів, патентний пошук, математичне моделювання процесу дозування, побудовано графічні залежності між конструктивними і режимними параметрами.

Отримані результати підтвердили ефективність модернізованої системи, яка забезпечує стабільну роботу, енергоощадність і високу метрологічну точність.

Розроблені рекомендації можуть бути використані при проектуванні дозаторів у борошномельній, комбікормовій, харчовій та хімічній промисловості.

Проведено аналіз виробничих небезпек та безпеки в надзвичайних ситуаціях при експлуатації обладнання у цеху, розроблено логіко-імітаційну модель виникнення травматизму.

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП	7
1. СТАН ПИТАННЯ, ЛІТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНИЙ ПОШУК	9
1.1 Загальні відомості про дозатори	9
1.2 Конструктивні типи дозаторів	9
1.3 Аналіз сучасного стану проблеми дозування зернової сировини	12
1.4 Аналіз науково-технічної літератури	12
1.5 Патентно-аналітичний огляд.....	25
2. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	29
2.1 Програма досліджень.....	29
2.2 Методика розрахунку дозаторів.....	30
3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ.....	36
3.1 Аналіз існуючих дозаторів	36
3.2 Загальні принципи проєктування дозаторів	42
3.3. Загальна конструкція дозатора	42
3.4 Математичне моделювання та дослідження параметрів дозатора	51
3.4.1. Побудова математичної моделі процесу дозування	51
3.4.2 Витрата через випускний отвір	52
3.4.3. Залежність маси дози від часу дозування	54
3.4.4. Залежність продуктивності від частоти обертання приводу.....	55
3.4.5 Залежність похибки дозування від швидкості подачі.....	56
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	59
4.1 Аналіз виробничих небезпек під час виробництва	59
4.2 Моделювання процесу виникнення травм та аварій.....	62
4.3 Розробка логіко-імітаційної моделі процесу виникнення травм під час виробництва	64

4.4 Розробка заходів щодо захисту населення.....	68
4.5 Безпека у надзвичайних ситуаціях.....	69
ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ.....	72
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	74

ВСТУП

Сучасний розвиток агропромислового комплексу вимагає підвищення ефективності виробничих процесів на всіх етапах — від підготовки сировини до фасування готової продукції. Одним із ключових процесів у технологічних лініях є дозування зернової сировини, від точності якого залежить якість продукції, зменшення втрат та економічність виробництва.

Нині у галузях переробки зерна, комбікормового й харчового виробництва широко застосовуються вагові бункерні дозатори, що дозволяють автоматизувати процеси подачі й контролю маси продукту. Водночас більшість серійних конструкцій мають обмеження: значну похибку вимірювання при вібраціях, складність обслуговування, а також нерівномірність потоку через геометрію бункера та механічні особливості дозувального вузла. Тому удосконалення конструкції вагового бункерного дозатора є актуальним завданням сучасного машинобудування, спрямованим на підвищення точності дозування, зниження енергоспоживання та автоматизацію роботи обладнання.

Метою роботи є дослідження конструктивних параметрів вагового бункерного дозатора зернової сировини, який забезпечує високу точність дозування, надійність роботи та стабільність функціонування в автоматизованих технологічних лініях.

Для досягнення мети необхідно виконати такі завдання:

1. Провести аналітичний огляд існуючих конструкцій дозаторів, класифікувати їх за принципом дії та сферою застосування.
2. Здійснити патентний пошук у галузі дозування зернової сировини та виявити сучасні тенденції у конструюванні.
3. Розробити вдосконалену конструкцію дозатора з підвищеною точністю дозування.

4. Провести математичне моделювання процесів дозування та побудувати графічні залежності основних параметрів.

5. Розглянути питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях при експлуатації дозатора.

Об'єктом дослідження є процес дозування зернової сировини у технологічних лініях переробних підприємств.

Предметом дослідження є конструкція та параметри вагового бункерного дозатора, що впливають на точність дозування, рівномірність подачі й надійність роботи.

Елементи конструкції можуть бути реалізовані у вигляді окремого модулю або в складі багатокомпонентної системи дозування.

1. СТАН ПИТАННЯ, ЛІТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНИЙ ПОШУК

1.1. Загальні відомості про дозатори

Дозатори є невід'ємною складовою більшості технологічних ліній, у яких здійснюється подача, зважування або фасування сипких і гранульованих матеріалів. Від точності їхньої роботи залежить якість кінцевої продукції, стабільність технологічного процесу та економічність виробництва. У сільському господарстві, харчовій, комбікормовій і хімічній промисловості дозатори використовуються для приготування рецептурних сумішей, подавання зерна, борошна, комбікормів, солей, мінералів та інших сипких продуктів.

Основними вимогами до дозаторів є:

- ☐ забезпечення стабільності подачі матеріалу;
- ☐ висока точність дозування (похибка не більше $\pm 0,5\%$);
- ☐ можливість автоматизації процесу;
- ☐ простота конструкції та обслуговування;
- ☐ мінімальні енерговитрати.

Залежно від принципу дії дозатори поділяються на об'ємні, вагові, шнекові, стрічкові, вібраційні, комбіновані тощо.

1.2. Конструктивні типи дозаторів

Об'ємні дозатори

Визначають кількість матеріалу за об'ємом робочої камери. Переваги - простота, висока продуктивність, але залежність точності від сипучості матеріалу.

Вагові дозатори

Працюють за принципом зважування маси продукту. Забезпечують найвищу точність дозування ($\pm 0,2\%$). Використовуються у зернопереробних, комбікормових і борошномельних підприємствах.

Таблиця 1.1 - Класифікація дозаторів

Критерій	Тип дозатора	Приклад застосування
За способом дозування	Об'ємний, ваговий	Для сипких і рідких матеріалів
За режимом роботи	Безперервний, порційний	Автоматичні лінії фасування
За видом приводу	Механічний, електромеханічний, пневматичний	Комбікормові лінії
За типом матеріалу	Для сипких, в'язких, рідких продуктів	Харчова промисловість
За числом компонентів	Однокомпонентні, багатоконпонентні	Змішувачі, комбікормові установки

Шнекові дозатори

Регулюють подачу матеріалу обертанням шнека. Застосовуються для сипких і пилюватих матеріалів. Забезпечують рівномірність потоку, але мають середню точність.

Стрічкові дозатори

Забезпечують безперервну подачу матеріалу стрічковим конвеєром із ваговими датчиками. Переваги — висока продуктивність, недолік — потреба в складному регулюванні.

Вібраційні дозатори

Матеріал переміщується по жолобу завдяки вібрації. Підходять для малих потоків, забезпечують плавну подачу.

Комбіновані дозатори

Поєднують об'ємний і ваговий принцип дозування, що дозволяє досягти високої точності при значній продуктивності.

Таблиця 1.2 - Порівняльна таблиця технічних характеристик

№	Тип дозатора	Принцип дії	Точність, %	Продуктивність, т/год	Переваги	Недоліки
1	Об'ємний роторний	Заповнення комірок ротора	2–5	5–40	Проста конструкція	Залежність від сипучості
2	Шнековий	Переміщення матеріалу шнеком	1–3	1–25	Рівномірність подачі	Зношування шнека
3	Стрічковий	Ваговий контроль стрічки	0,5–2	10–300	Висока продуктивність	Складна конструкція
4	Вібраційний	Подача вібраціями жолоба	1–3	0,5–15	Без обертальних деталей	Обмеження по продуктах
5	Ваговий бункерний	Зважування маси дози	0,2–0,5	5–30	Висока точність	Вартість, калібрування
6	Комбінований	Об'ємне + вагове дозування	0,2–1	10–40	Точність і швидкість	

1.3. Аналіз сучасного стану проблеми дозування зернової сировини

Дозування зернової сировини є однією з головних операцій у технологічних процесах виробництва борошна, комбікормів, будівельних сумішей та хімічних матеріалів. Від точності дозування безпосередньо залежить якість кінцевої продукції, стабільність технологічних параметрів і рівень економічної ефективності всього виробництва.

Сучасні системи дозування класифікуються на об'ємні, вагові, вібраційні, стрічкові та шнекові. Більшість традиційних конструкцій мають низку недоліків, серед яких:

- коливання витрати матеріалу при зміні вологості або розміру частинок;
- швидке зношування механічних елементів - шиберів, транспортерів, шнеків;
- значна інерційність при зважуванні матеріалу, що впливає на точність;
- відсутність автоматичного регулювання швидкості подачі.

З метою усунення цих проблем новітні розробки спрямовані на підвищення рівня автоматизації, використання тензометричних вагових систем, а також впровадження інтелектуальних контролерів керування (PLC, PID-регуляторів), що забезпечують стабільну роботу дозатора та зменшують похибки дозування.

1.4. Аналіз науково-технічної літератури

Аналіз наукових і технічних джерел свідчить, що розвиток конструкцій дозаторів сипких матеріалів відбувається переважно у трьох основних напрямках.

По-перше, підвищення точності зважування забезпечується завдяки застосуванню високочутливих тензометричних перетворювачів, цифрових фільтрів і програмного коригування похибок відповідно до міжнародних метрологічних стандартів, таких як ISO 45501:2015.

По-друге, важливим напрямом є автоматизація процесу дозування, яка передбачає інтеграцію дозаторів у комп'ютеризовані системи керування технологічними лініями. Для цього широко використовуються програмовані логічні контролери (ПЛК) від компаній *Siemens*, *OMRON*, *Schneider Electric*, що дозволяє здійснювати точне регулювання подачі матеріалу та контроль параметрів у реальному часі.

Третій напрям стосується оптимізації геометрії бункера та розвантажувальних вузлів, що дає змогу стабілізувати потік сипких матеріалів, зменшити ефект сегрегації частинок і забезпечити рівномірність дозування.

Серед сучасних наукових публікацій варто виокремити праці В.О. Білошицького (НУБіП України, 2020–2023), присвячені модернізації вагових систем; дослідження компанії *Siemens* (2021) щодо впровадження тензометричних платформ у промислові ПЛК; а також методичні рекомендації ISO і OIML R50, R61, які визначають вимоги до точності та метрологічної надійності вагових дозаторів.

Класифікація дозаторів за призначенням

За функціональним призначенням і типом матеріалу, що дозується, дозатори поділяють на три основні групи:

1. Дозатори зернової сировини — призначені для дозування зерна, комбікормів і продуктів їх переробки. Такі пристрої працюють із використанням бункера-накопичувача, оснащеного ворошилкою або вібратором для запобігання залипання матеріалу.
2. Дозатори слабкосипких і волокнистих матеріалів — застосовуються для подачі подрібнених кормів, сінажу, трав'яної січки та аналогічних сумішей. У конструкціях цього типу використовуються активні робочі органи бітерно-штифтового типу, які забезпечують рівномірне переміщення маси.
3. Дозатори рідких добавок і поживних розчинів — здійснюють подачу мелясних або сольових розчинів за допомогою насосів, бачків

постійного рівня або систем із каліброваними жиклерами. Вони особливо ефективні у технологічних лініях зі змішувачами періодичної дії.

Класифікація за конструктивним виконанням

Для дозаторів першої групи, що працюють із сипкими матеріалами, характерна дія сили тяжіння. За конструкцією робочих органів вони поділяються на:

- ☐ барабанні;
- ☐ тарілчасті;
- ☐ шнекові;
- ☐ стрічкові;
- ☐ скребкові;
- ☐ коливальні.

Кожен із цих типів має свої переваги щодо рівномірності подачі, енергоефективності та зручності очищення.

Дозатори другої групи зазвичай виконуються у вигляді накопичувачів-живильників, у яких застосовуються активні механізми подачі, що забезпечують перемішування та запобігають утворенню “містків”.

Дозатори третьої групи — це об’ємні мірники та дозувальні насоси, що працюють за порційним принципом, забезпечуючи точне дозування рідин і розчинів у технологічних процесах.

Дозатори 1 групи.

Дозатор живильний ДП-1

Дозатор типу ДП-1 призначений для порційного або безперервного дозування сипких продуктів у технологічних процесах переробки зерна, комбікормів чи харчової сировини.

При густині матеріалу $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$ дозатор забезпечує продуктивність до 5000 кг/год. Основні технічні параметри: діаметр барабана - 330 мм, розмір приймального отвору - 740×330 мм, кількість секцій барабана - 6, кількість магнітних дуг - 6, споживана потужність - 0,25 кВт,

частота обертання барабана — 31 об/хв.

Габаритні розміри установки — 890×1135×650 мм, маса — 220 кг.

Будова та конструктивні особливості

На рисунку 2.1 подано загальний вигляд дозатора. Його основними елементами є сталевий корпус та чарунковий барабан, змонтований на горизонтальному валу. Барабан розділений шестипроміжними дисками на секції, які розміщені зі зміщенням по гвинтовій лінії. Така конструктивна схема забезпечує безперервну та рівномірну подачу компонентів, що особливо важливо при дозуванні сипких матеріалів із різними фракціями.

Залежно від фізико-механічних характеристик дозованої сировини застосовуються змінні робочі диски — окремо для зернових, мучнистих, важкосипких продуктів або збагачувальних добавок. Над барабаном встановлений регулювальний скребок, який вирівнює шар матеріалу в чарунках і запобігає його ущільненню.

У зоні завантаження розташований спонукач, що складається з вала, лопатей і зірочки. Він сприяє рівномірному надходженню продукту в чарунки барабана, усуває залипання та покращує заповнення робочих секцій.

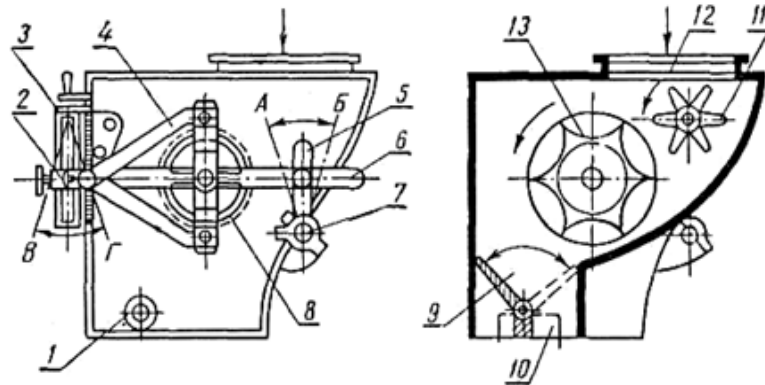
Принцип роботи

Сипкий матеріал подається у приймальну камеру дозатора, де за допомогою спонукача рівномірно надходить до чарункового барабана. Під час обертання барабана чарунки заповнюються продуктом і транспортують його у зону розвантаження. Скребок знімає надлишковий шар матеріалу, забезпечуючи постійну висоту заповнення чарунок. Після досягнення нижньої точки обертання дозована порція сипкого продукту висипається у приймальний лоток або транспортер для подальшого переміщення по лінії.

Переваги конструкції

- рівномірність подачі матеріалу завдяки гвинтовому розташуванню секцій;
- універсальність - можливість роботи з різними типами сипких матеріалів;

- мала енергоємність і простота регулювання подачі;
- компактність, зручність очищення та технічного обслуговування.



1 – вісь поворотного клапана; 2 – повзун-каретка; 3 – регулятор; 4 – важіль; 5 – приводний важіль; 6 – поздовжній важіль; 7 – вал привідний; 8 – храпове колесо; 9 – перекидний клапан; 10 – вихідний отвір; 11 – спонукач; 12 – приймальний патрубок; 13 – чарунковий барабан

Рисунок. 2.1 - Конструктивно-технологічна схема дозатора живильного ДП-1

У нижній частині дозатора встановлено перекидний клапан, який служить для відбору проб або відведення певної порції продукту. На вихідному патрубку корпусу розміщено магнітний сепаратор, що складається з шести магнітних дуг і виконує функцію очищення потоку корму від феромагнітних домішок.

Привід дозатора розташований збоку на корпусі та складається з ряду важелів і регулювальних елементів. На валу приводу закріплено гойдалковий важіль, який здійснює коливальні рухи по дузі. До цього важеля приєднано поздовжній регулювальний важіль, з'єднаний шарнірно з кулісою механізму регулювання подачі. Уздовж куліси переміщується повзун, що змінює кут повороту чарункового барабана. Позицію повзуна фіксують за шкалою, закріпленою безпосередньо на кулісі.

Система передавання руху складається з пальця повзуна, двох шатунів і серг із собачками, які входять у зачеплення з зубцями храпового колеса.

Таке конструктивне рішення забезпечує рівномірне обертання барабана і підвищує точність дозування.

Для живлення групи дозаторів застосовується зовнішній привід ПД-1, який передає рух одночасно на декілька валів. Він встановлений на металевій рамі та містить електродвигун і черв'ячний редуктор із передаточним відношенням 1:26. На вихідному валу редуктора закріплена маточина з кривошипом, що через систему тяг і важелів створює зворотно-поступальний рух валів дозаторів. Кількість подвійних ходів становить 31 за хвилину, габаритні розміри приводу — 1118×527×585 мм, маса — 335 кг.

Принцип дії

Під час роботи важіль приводу через кулісу й шатуни передає коливальні рухи сергам, що приводять у дію храповий механізм. При відхиленні веденої ланки вліво або вправо собачки по чергово повертають храпове колесо, а разом із ним — чарунковий барабан. Таким чином, за один подвійний хід приводу барабан здійснює два повороти на заданий кут.

Регулювання продуктивності дозатора здійснюється зміною положення повзуна на кулісі: чим нижче він розташований, тим більша кількість зубців храпового колеса захоплюється, що збільшує кут повороту барабана та обсяг подачі матеріалу. Після встановлення необхідного режиму повзун фіксується стопорним пристроєм.

Сипкий продукт надходить у приймальну частину дозатора, де спонукач рівномірно заповнює чарунки барабана. Під час обертання дозована порція проходить через магнітний сепаратор, очищується від металевих включень і далі подається у транспортний елемент або в лінію живлення.

Особливості експлуатації

Після монтажу дозатора та приводу перевіряють легкість обертання валів, виключаючи перекоси. Перш ніж розпочати роботу, дозатор обкатують протягом 30 хвилин на холостому ході. У процесі експлуатації кожні дві години рекомендується відкривати відкидну стінку та очищувати магнітні дуги від феромагнітних часток.

Дозатор концентрованих кормів ДК-10

Дозатор ДК-10 призначений для приймання і дозованої подачі концентрованих або комбінованих кормів із бункера або живильника у поточну лінію кормоцеху.

Основні технічні характеристики:

- продуктивність — 0,1–8,0 т/год;
- об'єм бункера — 0,5 м³;
- точність дозування — $\pm 5\%$;
- потужність електроприводу — 1,1 кВт;
- частота обертання спонукача — 40 об/хв;
- габарити — 1135×855×2600 мм;
- маса — 135 кг.

Будова та принцип роботи

Конструкція дозатора (рис. 2.42) включає:

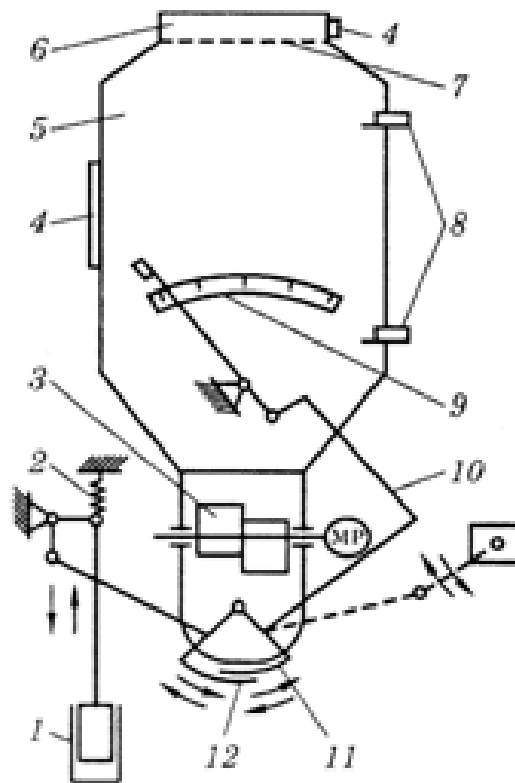
- бункер ємністю 0,5 м³;
- захисну сітку та приймальну горловину;
- датчики рівня для контролю заповнення;
- шкалу регулювання;
- щілинний дозувальний пристрій з електромагнітним керуванням;
- робочу заслінку та прутковий спонукач;
- електропривід, що забезпечує привід спонукача та заслінки.

Принцип дії полягає в тому, що матеріал із бункера надходить до приймальної частини, де регулюється подача за допомогою щілинного дозувального вузла. Спонукач запобігає зависанню кормів і забезпечує їх рівномірне надходження на вихід. Робоча заслінка відкривається електромагнітом на заданий час, після чого закривається, забезпечуючи точне відмірювання порції продукту.

Переваги дозатора ДК-10

- широкий діапазон регулювання продуктивності (0,1–8,0 т/год);
- стабільна точність дозування — до $\pm 5\%$;

- наявність системи автоматичного контролю рівня матеріалу;
- надійний електромеханічний привід з низькими енерговитратами;
- компактна конструкція, зручна для монтажу в технологічних лініях.



1 - електромагніт; 2 - пружина; 3 - спонукач; 4 - оглядове вікно; 5 - бункер; 6 - приймальна горловина; 7 - сітка; 8 - датчик рівня; 9 - шкала; 10 - важіль; 11 - дозувальна заслінка; 12 - оперативна (робоча) заслінка

Рисунок 2.2 - Конструктивно-технологічна схема дозатора ДК-10

Технологічний процес роботи дозатора ДК-10

Після завантаження бункера кормовими компонентами вмикається електропривід спонукача, який забезпечує рівномірне переміщення матеріалу всередині робочої зони. Після цього електромагніт керування відкриває нижню робочу заслінку, переміщуючи її вліво до крайнього положення.

Попередньо дозувальна заслінка встановлюється на необхідну продуктивність за шкалою регулювання, яка визначається в результаті попереднього тарування дозатора. Регулювання здійснюється або вручну за допомогою важеля, або дистанційно — через пульт керування.

У процесі обертання спонукача корм рівномірно висипається через вивантажувальне вікно, ширина якого регулюється в межах 60–300 мм, забезпечуючи постійний потік матеріалу. Після завершення циклу дозування електромагніт вимикається, і робоча заслінка під дією пружини автоматично закриває вікно подачі, запобігаючи подальшому висипанню матеріалу.

Рівень заповнення бункера підтримується автоматично за допомогою датчиків рівня, які працюють у діапазоні 400–1000 мм. Це дозволяє уникнути перевантаження та забезпечити безперервність роботи системи.

Тарілчастий дозатор ДТК

Дозатор типу ДТК призначений для точного дозування збагачувальних сумішей (преміксів), мікродобавок або інших компонентів комбінованих кормів, які вимагають високої точності подачі.

Основні технічні характеристики:

- продуктивність — 0,15–3,0 кг/хв;
- точність дозування — $\pm 3\%$;
- частота обертання дозувального диска — 25 об/хв;
- потужність електроприводу — 0,27 кВт;
- габаритні розміри — 390×650×515 мм;
- маса — 74 кг.

Будова та принцип дії

Конструкція дозатора (рис. 2.3) складається з електропривода, корпусу та вертикального вала з установленими на ньому робочими органами: дозувальною тарілкою, конусом і спонукачем. Привід містить електродвигун із черв'ячною передачею та муфтою, що забезпечує плавне і стабільне обертання дозувального вала.

Під час роботи матеріал із бункера надходить на поверхню обертової тарілки, де під дією відцентрової сили рівномірно розподіляється по її периметру.

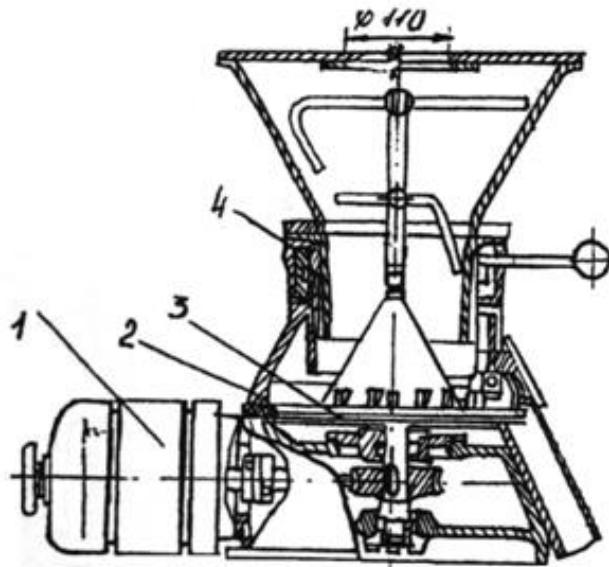
Завдяки конусній вставці та спонукачу забезпечується стабільний потік

суміші з мінімальною пульсацією. Кількість поданої суміші визначається частотою обертання тарілки, геометрією отворів і властивостями матеріалу.

Після дозування заданої кількості продукту суміш подається у змішувач або транспортний пристрій технологічної лінії.

Переваги дозатора ДТК

- висока точність подачі (до $\pm 3\%$);
- компактність і проста конструкція;
- плавне регулювання продуктивності;
- надійна робота з різними видами дрібнодисперсних матеріалів;
- низьке енергоспоживання та зручність обслуговування.



1- електродвигун; 2- корпус; 3- тарілка; 4 – циліндр з підйомним пристроєм

Рисунок 2.3 - Дозатор тарілчастий ДТК

У нижній частині дозатора на валу за допомогою шпонкового з'єднання встановлюється черв'ячне колесо, яке забезпечує передачу обертального моменту від приводу. Над дозувальною тарілкою в корпусі розміщено рухомий циліндр із регулювальною гайкою, положення якого можна змінювати за висотою за допомогою важеля керування. Це дає

можливість точно встановлювати зазор між циліндром і конусом для зміни інтенсивності подачі матеріалу.

У верхній частині корпусу змонтовано накопичувальний бункер, який подає суміш у зону дозування. Безпосередньо над тарілкою встановлено скребок, що скидає дозовані компоненти в кормопровід.

Технологічний процес роботи

Компоненти з накопичувального бункера надходять у рухомий циліндр, далі проходять у зазор між циліндром і конусом, потрапляють на обертову тарілку та розподіляються по її поверхні. Під дією відцентрової сили матеріал переміщується до периферії тарілки, де скребок знімає його та спрямовує у вихідний патрубок.

Продуктивність дозатора регулюється зміною висоти рухомого циліндра, а отже — розміру зазору між ним і тарілкою з конусом, що обертаються. Зменшення зазору призводить до зниження витрати матеріалу, а його збільшення — до підвищення продуктивності дозатора.

Бункери-дозатори для зберігання кормів БСК-10 і БСК-25

Бункери-дозатори типу БСК-10 та БСК-25 призначені для накопичення, зберігання та видачі концентрованих кормів у системах автоматизованої подачі.

Конструктивно бункер (рис. 2.4) являє собою місткість, зібрану з кількох поясів циліндричної або кубічної форми. Кожен пояс складається з оцинкованих гофрованих листів, з'єднаних болтовими з'єднаннями. На верхньому поясі встановлюється датчик рівня корму, який контролює заповнення ємності. Верх бункера закривається металевою кришкою, що запобігає попаданню пилу й вологи. Опора бункера виконується у вигляді чотирьох стійок, які забезпечують стабільність конструкції.

Нижня частина має конічну або пірамідальну форму, що сприяє рівномірному сходженню кормів під дією сили тяжіння. У конусі встановлено розсікач, який рівномірно розподіляє потік матеріалу по стінках і запобігає утворенню “містків”. Конічна частина посилена ребрами

жорсткості та приєднана до рамної основи, до якої кріпиться вивантажувальний шнековий транспортер.

Конструкція транспортера

Транспортер складається з трубчастих секцій діаметром 120 мм, з'єднаних між собою за допомогою хомутів. Всередині труб розташований шнек, який обертається на трьох шарикопідшипниках. Рух на шнек передається від електродвигуна через клинопасову передачу. У верхній частині труб передбачені вирізи під воронки, до яких приєднуються рукави для подачі корму.

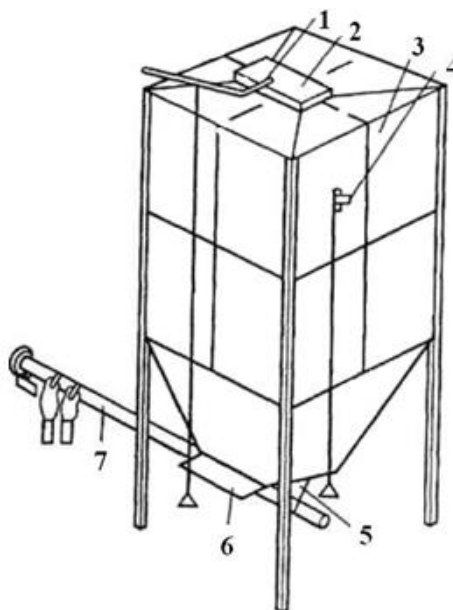
Технологічний процес роботи

Під час завантаження корм із кормовоза по напірному трубопроводу надходить у порожнину бункера. Разом із кормом подається повітря, яке відводиться через випускний рукав і фільтр-мішок, що затримує пилові частинки. Коли рівень матеріалу досягає верхнього датчика, система подає світловий сигнал, після чого подачу припиняють.

Вивантаження кормів відбувається за допомогою шнекового транспортера, який забезпечує безперервне або дозоване подавання матеріалу у кормоцех чи транспортну лінію.

Переваги бункерів-дозаторів БСК-10 і БСК-25

- значна місткість і можливість роботи з різними видами кормів;
- герметична конструкція, що запобігає втратам та запиленню;
- наявність автоматичного контролю рівня завантаження;
- рівномірне вивантаження завдяки розсікачам та шнековому транспортеру;
- простота монтажу, обслуговування і висока надійність у роботі.



1- кришка; 2- завантажувальна горловина; 3- місткість; 4-датчик рівня; 5- переходник; 6- засувка; 7- транспортер вивантажувальний

Рисунок 2.4 – Бункер дозатор БСК-10

Таблиця 1.3 - Технічні характеристики бункерів БСК-10, БСК-25

Показник	Марка бункера	
	БСК-10	БСК-25
Місткість бункера, м	10	25
Висота, мм	5020	8355
Спосіб завантаження	Завантажувачем типу ЗСК-10	Пневмозавантажувачами
Спосіб вивантаження	Спиральним транспортером	Шнековим транспортером
Продуктивність, т/год.	2,1	6,15
Потужність на привод, кВт	0,85; 0,75	2,2
Маса, кг	750	766

Таблиця 1.4 - Технічні характеристики дозаторів

Показник	ZEO-BV	SWEDA DWS-301	Westeria	ZONES UN	Novital	CN 1108	US 2019
Тип дозатора	Ваговий бункерний	Ваговий порційний	Стрічковий	Вібраційний	Гравітаційний	Автоматичний	Ваговий шнековий
Продуктивність, т/год	10–30	5–20	30–60	2–10	5–15	20–40	15–35
Межа дозування, кг	10–50	5–100	—	0,1–10	5–25	10–50	5–30
Точність, %	±0,2	±0,5	±1,0	±2,0	±1,0	±0,3	±0,4
Потужність, кВт	0,25	0,37	0,55	0,18	—	0,3	0,5
Маса, кг	150	180	250	90	120	200	230
Особливості	Тензодатчики, PLC	Автоконтроль циклу	Регулювання подачі	Нержавірка	Самоплив	Цифрові датчики	Регулювання шнека

1.5 Патентно-аналітичний огляд

Метою патентного пошуку є вивчення існуючих технічних рішень у галузі дозування зернової сировини, виявлення сучасних тенденцій розвитку конструкцій дозаторів та визначення напрямів удосконалення вагових бункерних систем. Патентний аналіз дозволяє встановити рівень техніки, унікальні конструктивні рішення та наявність подібних розробок, що запобігає дублюванню і забезпечує наукову новизну дипломної роботи.

Основні завдання патентного пошуку:

1. Зібрати інформацію про чинні патенти України та зарубіжних країн у галузі дозаторів зернової сировини.
2. Проаналізувати конструктивні особливості відомих розробок.
3. Визначити переваги та недоліки існуючих технічних рішень.

4. Виявити перспективні напрямки вдосконалення вагових дозаторів.

Методика проведення патентного аналізу

Пошук проводився у відкритих базах даних:

- Національного патентного відомства України (Укрпатент) — <https://ukrpatent.org>;
- Європейського патентного відомства (Espacenet) — <https://worldwide.espacenet.com>;
- United States Patent and Trademark Office (USPTO);
- Google Patents — <https://patents.google.com>.

Пошук здійснювався за ключовими словами: *“дозатор зернової сировини”, “ваговий бункерний дозатор”, “hopper scale”, “bulk material feeder”, “gravimetric dosing system”*.

Критеріями відбору були:

- рік публікації (2010–2025 рр.);
- наявність елементів автоматизації;
- застосування у зернопереробній чи комбікормовій промисловості.

Нижче наведено вибрані технічні рішення, що становлять інтерес для аналізу.

Таблиця 1.5 - Аналіз вітчизняних та зарубіжних патентів

№	Номер патенту	Країна	Назва розробки	Основні конструктивні особливості	Переваги
1	UA 129845 U	Україна	Ваговий дозатор зернової сировини	Двоступенева система дозування (грубе/точне), датчики маси	Висока точність, автоматичне керування
2	UA 122910 U	Україна	Пристрій для зважування сипких продуктів	Використання вібраційної системи компенсації	Зменшення похибки при вібраціях

№	Номер патенту	Країна	Назва розробки	Основні конструктивні особливості	Переваги
				навантажень	
3	UA 112567 C2	Україна	Дозатор бункерного типу з лінійним живильником	Дозування через регульований шибер	Простота, надійність
5	CN 110845709 A	Китай	Intelligent Hopper Weighing Feeder	Вбудовані тензодатчики та контролер PLC	Інтелектуальне керування дозуванням
6	US 20190287564 A1	США	Automatic gravimetric batching system	Застосування серводвигунів для точного керування потоком	Висока швидкодія, точність $\pm 0.1\%$
7	EP 3847632 A1	ЄС	Modular dosing system for powders	Модульна конструкція для різних типів зернової сировини	Легка адаптація, сервісне обслуговування

Порівняльний аналіз технічних рішень

Порівняння показує, що більшість сучасних розробок спрямовано на:

- ☐ підвищення точності дозування за рахунок електронних тензометричних систем;
- ☐ зменшення вібраційного впливу на результати зважування;
- ☐ автоматизацію процесу завдяки використанню мікроконтролерів або PLC;
- ☐ інтеграцію дозатора в загальні системи управління виробництвом (SCADA, IoT).

Водночас існують і недоліки:

- ☐ складність калібрування багатобункерних систем;
- ☐ висока вартість імпортованих комплектуючих;
- ☐ потреба в точному нівелюванні платформи для зважування.

Українські конструкції (патенти UA 129845, UA 112567) мають простішу будову, але поступаються за точністю та рівнем автоматизації зарубіжним аналогам (CN 110845709, US 20190287564). Тому доцільно розробити модернізований ваговий бункерний дозатор із двоступеневим режимом подачі матеріалу (грубе/точне дозування) та цифровою системою обробки сигналів від тензодатчиків.

Висновки за результатами патентного пошуку

1. Проведений аналіз показав, що вагові бункерні дозатори є найперспективнішими пристроями для точного дозування зернової сировини.
2. Основні напрями розвитку технологій — впровадження систем автоматичного керування, використання інтелектуальних датчиків і цифрової компенсації похибок.
3. Найбільш ефективними вважаються системи з двоступеневим дозуванням, тензодатчиками класу С3-С4 та автоматичним калібруванням.
4. Вітчизняні розробки характеризуються простотою, але потребують вдосконалення системи вимірювання та електронного керування.
5. На основі патентного аналізу визначено можливість розробки нової конструкції дозатора, у якій передбачено покращену форму бункера, цифровий блок обробки сигналів і адаптивне керування швидкістю подачі.

2. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Програма досліджень

Дослідження вагового бункерного дозатора проводяться з метою встановлення закономірностей впливу конструктивних та режимних параметрів на основні показники його роботи — точність, рівномірність подачі та продуктивність. Програма розроблена з урахуванням попереднього теоретичного аналізу, розрахункових залежностей та результатів моделювання у середовищі MATLAB / Python.

Дослідження проводяться за такими напрямками:

1. Вплив частоти обертання приводу n (об/хв) на масу дози при фіксованому часі дозування.
2. Вплив часу дозування t (с) на стабільність маси дози при фіксованій частоті приводу.
3. Вплив діаметра випускного отвору D (м) на масову витрату сипкого матеріалу.
4. Оцінка точності дозування за коефіцієнтом варіації та середньоквадратичним відхиленням маси.

Таблиця 2.1 - Програма досліджень:

№ етапу	Назва етапу	Зміст робіт	Очікуваний результат
1	Підготовчий етап	Монтаж дозатора, перевірка герметичності, калібрування тензодатчиків	Підготовка установки до роботи
2	Вибір матеріалу	Підбір зернової сировини різної густини (зерно, цукор, пісок)	Створення варіацій за ρ_b
3	Дослідження режимів дозування	Визначення $m = f(t, n)$ при фіксованому D	Графіки впливу часу та частоти
4	Конструктивний	Зміна D , α , h для побудови	Визначення

№ етапу	Назва етапу	Зміст робіт	Очікуваний результат
	експеримент	$Q = f(D)$, $V = f(H)$	геометричних залежностей
5	Дослідження точності	Повторення дозувань (10–20 разів), визначення δ (%)	Статистичний аналіз стабільності
6	Математичне моделювання	Побудова 3D-моделі $m = f(t, p)$	Поверхня залежності маси дози
7	Узагальнення	Аналіз усіх результатів, визначення оптимальних параметрів	Висновки та рекомендації

2.2 Методика розрахунку дозаторів

Вхідні припущення (використані у прикладах)

1. Маса однієї дози $m_d = 25$ кг.
2. Цільовий час циклу $t_c = 6$ с (включно з наповненням і скиданням).
3. Насипна густина продукту $\rho = 750$ кг/м³ (зерно, крупа).
4. Головний запас висоти для приведення в рух — $H = 0,5$ м (ефективна висота падіння при гравітаційному потоці).
5. Приймаємо гравітаційне прискорення $g = 9,81$ м/с².
6. Конус бункера має кут нахилу до горизонталі $\geq 55^\circ$ (рекомендовано для сипучих матеріалів).
7. Для розрахунку міцності використовуємо сталеву плиту з допустимим напруженням $\sigma_{\text{доп}} = 150$ МПа (консервативно).

Розрахунок продуктивності:

$$\dot{m} = \frac{m_d}{t_c}$$

Наприклад:

- ☐ маса дози — 25 кг
- ☐ час циклу — 6 с

$$\dot{m} = \frac{25}{6} = 4,1666667 \text{ кг/с}$$

Переведення в тони на годину:

$$\dot{M}_{\text{год}} = \dot{m} \cdot 3600 = 4,1666667 \cdot 3600 = 15000 \text{ кг/год} = 15,$$

Об'ємний потік:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{4,1666667}{750} = 0,00555556 \text{ м}^3/\text{с}$$

Орієнтовний розмір випускного отвору (через кінетичний наближення)

Припустимо, що середня швидкість в отворі приблизно

$$v \approx \sqrt{2gH}. \text{ Для } H = 0,5 \text{ м:}$$

$$v = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,5} = \sqrt{9,81} = 3,132 \text{ м/с}$$

Потрібна площа отвору A з умови $\dot{V} = A \cdot v$:

$$A = \frac{\dot{V}}{v} = \frac{0,00555556}{3,132} = 0,001775 \text{ м}^2$$

Еквівалентний діаметр отвору (круглий):

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,001775}{\pi}} = 0,0476 \text{ м} \approx 47,6 \text{ мм}$$

Примітка: чисто теоретичний розрахунок показує малий діаметр ≈ 48 мм. На практиці для сипучих зернистих матеріалів та щоб уникнути зажувань/зависань, приймають значно більший діаметр (наприклад 80–150 мм) і дозують вже механічним затвором (шибер/ротор) або шнеком. Тобто: розрахунок дає мінімум теоретичний, але для надійності — вибрати більший отвір і керувати подачею заслінкою.

Розрахунок часу наповнення: грубе / точне дозування

Типова стратегія: наповнення у два етапи.

- Грубе (швидке) — наповнення до $X\%$ маси (наприклад $X=85\%$).
- Точне — повільна підсипка до повної маси.

Якщо грубе наповнення відбувається із масовим потоком m_g (висока швидкість), і точне — m_t (повільно), то:

$$t_{\text{грубе}} = \frac{X \cdot m_d}{\dot{m}_g}, \quad t_{\text{точне}} = \frac{(1 - X) \cdot m_d}{\dot{m}_t}$$

Приклад (припущення):

$$\dot{m}_g = 8 \text{ кг/с}, \dot{m}_t = 0,5 \text{ кг/с}, X = 0,85.$$

Тоді:

$$t_{\text{грубе}} = \frac{0,85 \cdot 25}{8} = \frac{21,25}{8} = 2,65625 \text{ с}$$

$$t_{\text{точне}} = \frac{0,15 \cdot 25}{0,5} = \frac{3,75}{0,5} = 7,5 \text{ с}$$

Це дає загальний час $\sim 10,16 \text{ с}$ — занадто довго; отже для досягнення 6 с треба або підвищити m_g і m_t або зменшити масу дози/змінити логіку. Реально: грубе може бути дуже швидким, а точне — коротким (наприклад $m_t=2 \text{ кг/с}$, тоді сумарно $\sim 4\text{--}5 \text{ с}$).

Висновок: потрібно проектувати режими грубого і точного дозування під цільовий час циклу — забезпечити достатній швидкий потік під час грубої фази і точний контроль під час фінішної.

Вибір тензодатчиків (вантажоприймальна частина)

Навантаження на датчики = маса бункера + заповнений вантаж (резервуар + продукт).

Припустимо:

- маса пустого бункера $m_b=50 \text{ кг}$,
- максимальна повна маса продукту $m_{\text{max}}^{[f_0]}=150 \text{ кг}$.

Повне навантаження: $G=m_b+m_{\text{max}}^{[f_0]}= 200 \text{ кг}$

Рекомендується запас безпеки (коефіцієнт) $k=2k = 2k=2 \rightarrow$ вибираємо сумарну номінальну вантажопідйомність датчиків $\geq 400 \text{ кг}$.

Якщо застосувати 4 тензодатчики:

$$\text{Вантажопідйомність одного датчика} \geq \frac{400}{4} = 100 \text{ кг}$$

Рекомендація: вибрати $4 \times 100\text{--}200$ кг датчики (клас точності С3), щоб забезпечити запас і довговічність. Обов'язкова калібровка після монтажу

Розрахунок приводу розвантажувальної заслінки роторного механізму

Орієнтовний метод: визначити момент, необхідний для подолання сил тертя + сил від продукту.

Нехай для затвору еквівалентна сила тертя від ущільнювачів і спротиву потоку F . Плече r — відстань від осі приводу до точки прикладання сили (приблизно радіус заслінки).

Момент $M = F \cdot r$.

Оцінка (практичне наближення): для невеликих шарнірних заслонок $M_{\text{необх}} \approx 5 \dots 15$ Нм. Для більших заслонок/роторів — $20 \dots 80$ Нм.

Потужність при заданій частоті обертання:

$$P = M \cdot \omega$$

де $\omega = 2\pi n / 60$ (рад/с), n — об/хв приводу.

Приклад: вибираємо мотор-редуктор з моментом $M = 25$ Нм, швидкістю $n = 60$ об/хв = 60 об/хв.

$$\omega = 2\pi \cdot \frac{60}{60} = 2\pi \approx 6,2832 \text{ рад/с}$$

$$P = 25 \cdot 6,2832 = 157,08 \text{ Вт} \approx 0,16 \text{ кВт}$$

Додаємо запас потужності $2\times \rightarrow$ вибір двигуна $\sim 0,25\text{--}0,37$ кВт з редуктором, що дає момент $25\text{--}40$ Н·м — типовий і надійний.

Тиск на стінки бункера та товщина стінки (спрощена перевірка міцності)

Гідростатичний тиск від насипного матеріалу на глибині h :

$$p = \rho g h$$

При $\rho = 750 \text{ кг/м}^3$ і $h = 0,8 \text{ м}$:

$$p = 750 \cdot 9,81 \cdot 0,8 = 5886 \text{ Па} \approx 5,9 \text{ кПа}$$

Це невеликий тиск порівняно з допустимими напруженнями сталі — отже міцність на розрив/стиск не є визначальною; основний критерій —

жорсткість і запобігання деформації. Тому товщину обирають за умовами жорсткості та технологічності:

Рекомендація (практична):

- для тонкостінного сталевого бункера діаметр $\sim 0,6\text{--}1,2$ м — товщина стінки 2–4 мм (сталь 3);
- для харчового виконання (AISI 304) — 2–3 мм;
- додаткові ребра жорсткості по окружності та по висоті для зменшення прогинів.

(формальні розрахунки товщини по міцності дають занадто мале значення, тому головний фактор — жорсткість, корозійні умови і технологічний запас).

Запобігання архінгу та зависань (кінематичні критерії)

- Кут нахилу бічної поверхні до горизонталі повинен бути $\geq 55^\circ$ для зерен; для погано сипучих матеріалів — $\geq 60\text{--}70^\circ$.
- Рекомендовано гладке полірування внутрішніх стінок (для борошна/пилу — можливе антистатичне виконання).
- Для погано сипучих продуктів використовують вібратори або внутрішні перфоровані вставки.

Калібрування вагового модуля та похибка

- Тензодатчики необхідно калібрувати гирями/еталонною вагою після монтажу.
- Рекомендується використовувати фільтрацію (часову усереднення) для зменшення шуму від вібрацій.
- Розрахунок похибки: якщо точність системи $\pm 0,2\text{--}0,5\%$ від маси дозування (для С3) — для дози 25 кг це $\pm(0,05\text{--}0,125)$ кг.

Підсумкові рекомендації по вибору компонентів (практичні)

1. Отвір/випуск: теоретичний ≈ 48 мм, але у реальній конструкції — обрати 80–150 мм і керувати подачею заслінкою/ротатором.
2. Тензодатчики: 4 шт. $\times$ 100–200 кг (клас С3), загальна номінальна вантажопідйомність ≥ 400 кг.

3. Привід заслінки/ротора: мотор-редуктор 0,25–0,37 кВт з моментом 25–40 Н·м (редукція в залежності від геометрії заслінки).
4. Товщина стінок: 2–4 мм (сталь або харчова нержавійка AISI 304), із ребрами жорсткості.
5. Кут конуса: нахил бічної поверхні до горизонталі $\geq 55^\circ$ (для стандартного зерна).
6. Система керування: PLC з алгоритмом грубе/точне дозування, фільтрацією вагового сигналу, журналом доз.
7. Запас по точності: забезпечити калібрування, температурну компенсацію і захист від вібрацій.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1 Аналіз існуючих дозаторів

Дозатори є невід'ємним елементом більшості механізованих та автоматизованих технологічних ліній. Їх призначення полягає у відмірюванні й подачі точно визначеної кількості сипучих, зернистих, порошкоподібних або кускових матеріалів у технологічні процеси. Правильно підібраний дозатор забезпечує стабільність роботи лінії, підвищує якість кінцевої продукції, мінімізує втрати сировини та витрати енергії.

Кожен тип дозаторів має свої конструктивні особливості, переваги, недоліки та сферу застосування. Вибір конструкції визначається фізико-механічними властивостями матеріалу, необхідною точністю, режимом подачі (безперервний чи порційний), а також вимогами технологічного процесу.

Класифікація дозаторів

За принципом дії всі дозатори поділяються на:

1. Об'ємні
2. Вагові (гравіметричні)
3. Об'ємно-вагові (комбіновані)
4. Механічні транспортувальні
5. Вібраційні

За режимом подачі:

- ☐ порційні (дискретні)
- ☐ безперервні

За типом сировини:

- ☐ для сипучих зернистих матеріалів;
- ☐ для порошкоподібних матеріалів;
- ☐ для кускових матеріалів;
- ☐ для пастоподібних та в'язких мас.

Нижче наведений детальний огляд основних конструкцій.

Об'ємні дозатори

Роторні дозатори складаються з корпусу циліндричної або багатогранної форми та обертового ротора з комірками постійного об'єму. Матеріал надходить у комірки при одному положенні ротора і вивантажується у нижній частині при подальшому обертанні.

Переваги:

- простота конструкції;
- стабільна подача при рівномірній сипучості;
- можливість роботи з широким спектром матеріалів.

Недоліки:

- залежність точності від вологості та текучості;
- абразивний знос лопатей;
- обмежена точність порівняно з ваговими конструкціями.

Поршневі дозатори

Поршневі дозатори використовуються переважно для паст, рідкотекучих та високов'язких матеріалів. Об'єм дози визначається ходом поршня та діаметром циліндра.

Переваги: висока повторюваність, герметична подача. Недоліки: складність конструкції, обмеження за продуктивністю.

Камерні та засувкові дозатори

Такі дозатори мають відсік певного об'єму, який заповнюється матеріалом через верхній отвір і спорожнюється після відкриття нижньої заслінки.

Переваги: низька вартість, простота. Недоліки: невисока точність, труднощі при роботі з вологими або злежаними матеріалами.

Вагові дозатори

Вагові дозатори відмірюють матеріал за масою, що забезпечує найвищу точність незалежно від сипучості, вологості або гранулометричного складу.

Порційні вагові бункерні дозатори

Порційні дозатори складаються з:

- завантажувального бункера;
- вагового бункера на тензодатчиках;
- засувки або шибера подачі;
- нижньої розвантажувальної заслінки;
- контролера або мікропроцесорної системи керування.

Робочий цикл включає два етапи: 1) завантаження бункера до заданої маси; 2) розвантаження порції та підготовку до наступного циклу.

Переваги: найвища точність (до $\pm 0,1-0,3$ %), мінімальні втрати. Недоліки: циклічність роботи, що обмежує продуктивність.

Безперервні вагові дозатори

Складаються зі стрічкового або шнекового транспортера, встановленого на силовимірювальних датчиках.

Переваги: рівномірна подача в режимі 24/7. Недоліки: складність калібрування, чутливість до вібрацій.

Стрічкові вагові дозатори

Матеріал транспортується стрічкою, навантаження на яку вимірюється тензодатчиком.

Переваги: великі витрати (до 500 т/год). Недоліки: обмежена точність (1–3 %).

Механічні шнекові дозатори

Шнекові дозатори відмірюють кількість матеріалу за допомогою обертання шнека. Продуктивність пропорційна частоті обертання.

Переваги: можливість точного регулювання подачі, компактність. Недоліки: високий знос шнека, залежність від сипучості.

Типові конструкції включають:

- одновальний шнек;
- двовальний синхронний шнек;
- горизонтальне та нахилене розташування.

Вібраційні дозатори

У вібраційних дозаторах подача забезпечується коливанням жолоба. Напрямок та амплітуда вібрації визначають швидкість переміщення матеріалу.

Переваги: відсутність обертових деталей, можливість роботи з крихкими матеріалами. Недоліки: залежність точності від стабільності вібрацій.

Комбіновані дозатори

Комбіновані дозатори поєднують переваги об'ємних і вагових систем: спочатку формується попередня порція об'ємом, після чого виконується точне коригування за масою.

Переваги: висока продуктивність та точність. Недоліки: складність конструкції, висока вартість.

Конструктивні особливості порційних бункерних вагових дозаторів

Оскільки у кваліфікаційній роботі розглядається ваговий бункерний дозатор, детальніше розглянемо його ключові елементи:

1) Бункер дозування

Забезпечує накопичення матеріалу потрібного об'єму. Форма — циліндрична або конічна. Конус запобігає зависанню матеріалу.

2) Тензометрична платформа

Складається з 1–4 тензодатчиків, які сприймають навантаження бункера.

3) Завантажувальний вузол

Може бути:

- шиберний (двоступеневий),
- шнековий,
- вібраційний.

4) Розвантажувальні органи

Частіше застосовують секторні заслінки або шиберні клапани.

5) Електропривід

Асинхронний двигун з частотним регулятором або пневмопривід.

6) Система керування

Включає ПЛК (Siemens, OВЕН, Schneider), датчики положення, інтерфейс оператора.

Таблиця 3.1 - Порівняння основних конструкцій дозаторів

Тип дозатора	Точність	Продуктивність	Чутливість до вологості	Складність	Сфера застосування
Об'ємний	низька	висока	висока	низька	крупне зерно
Ваговий	висока	середня	низька	середня	борошно, зерно
Стрічковий	середня	висока	середня	середня	потоки 50–500 т/год
Шнековий	середня	середня	висока	середня	сипучі суміші
Вібраційний	середня	мала	середня	низька	порошки, мілкі фракції
Комбінований	висока	висока	низька	висока	точне пакування

Таблиця 3.2 – Порівняльні технічні характеристики дозаторів зернової сировини

№	Тип дозатора	Діапазон дозування, кг	Точність дозування, %	Продуктивність, т/год	Переваги	Недоліки	Типові галузі застосування
1	Об'ємний роторний	1–100	±2–5	5–40	Проста конструкція, висока надійність	Залежність точності від сипучості матеріалу	Комбікормові, зернові, борошномельні
2	Шнековий	0,5–50	±1–3	1–25	Рівномірна подача, можливість автоматизації	Зношування шнека, обмеження за вологістю	Харчова, комбікормова

№	Тип дозатора	Діапазон дозування, кг	Точність дозування, %	Продуктивність, т/год	Переваги	Недоліки	Типові галузі застосування
3	Стрічковий (гравіметричний)	5–1000	$\pm 0,5$ –2	10–300	Безперервна подача, можливість інтеграції у лінії	Складна конструкція, потребує налаштування	Зернопереробні, цементні, комбікормові
4	Вібраційний	0,1–20	± 1 –3	0,5–15	Рівномірна подача, без обертальних деталей	Залежність від вологості, чутливість до налаштування	Харчова, фармацевтична
5	Ваговий бункерний (порційний)	5–100	$\pm 0,2$ –0,5	5–30	Висока точність, автоматичне керування	Вища вартість, необхідність калібрування	Борошномельна, комбікормова, харчова
6	Комбінований (об'ємно-ваговий)	10–200	$\pm 0,2$ –1	10–40	Поєднання високої точності та продуктивності	Складна система керування	Автоматизовані лінії змішування

Аналіз таблиці 3.2

- Найвищу точність забезпечують вагові бункерні та комбіновані дозатори.
- Найпростішу конструкцію мають об'ємні роторні.
- Для автоматизованих систем найкраще підходять вагові та шнекові дозатори, оскільки легко інтегруються з контролерами PLC.
- Для сипучих матеріалів із різною зернистістю оптимальним вибором є ваговий бункерний дозатор — він забезпечує точність $\pm 0,2$ –0,5 %,

стабільну роботу й може працювати в режимі грубого/точного дозування.

3.2 Загальні принципи проєктування дозаторів

Конструкція вагового бункерного дозатора має забезпечувати точне дозування зернової сировини за масою, стабільну роботу, зручність обслуговування та надійність у роботі. Основними вимогами до конструкції є:

- точність дозування не гірше $\pm 0,2 \%$;
- забезпечення рівномірного потоку матеріалу;
- виключення зависання продукту у бункері;
- мінімізація вібраційного впливу на ваговий модуль;
- простота монтажу та очищення.

При проєктуванні враховано: фізико-механічні властивості зернових матеріалів (насипна густина $\rho = 700\text{--}800 \text{ кг/м}^3$, кут природного укосу $\varphi = 35\text{--}40^\circ$), а також умови експлуатації в технологічних лініях комбікормових і борошномельних заводів.

3.3. Загальна конструкція дозатора

Удосконалений ваговий бункерний дозатор складається з таких основних вузлів (рис. 3.1):

1. Бункер для приймання матеріалу – конічний резервуар із кутом нахилу стінок 60° , що забезпечує самопливне вивантаження зернової сировини.
2. Завантажувальний патрубок – з'єднаний із транспортним механізмом (шнек, норія або транспортер).
3. Дозувальний орган – шиберна заслінка з електроприводом, яка має два режими відкриття: грубе і точне дозування.

4. Ваговий модуль – система з чотирма тензодатчиками класу С3, закріпленими під опорною рамою.
5. Розвантажувальний вузол – нижня заслінка, що відкривається після зважування порції.
6. Електронний блок керування – мікроконтролер або PLC, який обробляє сигнали з тензодатчиків, керує шиберами та реєструє масу доз.
7. Опорна рама – зварна металева конструкція, що забезпечує жорсткість і ізоляцію вагових датчиків від вібрацій.

Матеріалом виготовлення основних елементів є сталь 3 (фарбована) або нержавіюча сталь AISI 304 для харчового виконання.

Рисунок 3.1 - Бункерний дозатор сипучих матеріалів

Складається з:

- конічного бункера,

- верхньої технологічної кришки,
- нижнього дозуючого вузла з електроприводом.

Він працює за принципом керованого випуску матеріалу з бункера, забезпечуючи точну подачу за об'ємом або масою.

Нижче подано детальний опис будови та принципу роботи дозатора, зображеного на фото. Це бункерний (ваговий або об'ємний) дозатор сипучих матеріалів із конічним бункером і механізмом регулювання подачі.

Рисунок 3.2 - Загальний вигляд дозатора

Будова дозатора

1. Завантажувальний бункер

□ Основна частина дозатора — великий конічний бункер, виготовлений зі сталевих листів.

□ Верхня частина — циліндрична, перехід до конуса знизу.

□ Призначений для накопичення та рівномірної подачі зерна або іншої сипучої сировини.

2. Верхня кришка з патрубками

На верхній плиті видно декілька циліндричних отворів/патрубків:

□ основний завантажувальний патрубок, через який матеріал подається в бункер;

□ допоміжні технологічні отвори:

- для аспірації,
- оглядовий люк,
- можливі з'єднання з іншими транспортерами.

3. Посилювальні елементи та кронштейни

На зовнішній поверхні є зварні кронштейни:

- для монтажу дозатора на рамі або технологічній лінії;
- для встановлення датчиків або обслуговування.

4. Нижній вузол дозування

У нижній частині видно:

□ фланець, на якому закріплено дозуючий механізм;

□ механізм регулювання (можливо шибер, секторна заслінка, шлюзовий живильник чи патрон дозатора);

□ електропривод (чорний корпус збоку) — відповідає за відкривання/закривання заслінки або обертання ротора.

5. Вивантажувальний патрубок

Нижній патрубок служить для:

□ виведення дозованої кількості матеріалу у транспортну систему (шнек, норію, транспортер),

- або для наповнення тари.

Призначення та сфера застосування

Ваговий бункерний дозатор призначений для точного порційного дозування сипкої зернової сировини (зерно, крупи, шрот, борошно, комбікормові суміші) у складі механізованих технологічних ліній. Дозатор забезпечує автоматизовану подачу контрольованої маси продукту згідно із заданими параметрами, що дозволяє досягти високої якості дозування та стабільності технологічного процесу.

Обладнання використовується в галузях:

- борошномельне виробництво;
- комбікормові заводи;
- лінії очищення й сортування зерна;
- підприємства харчової промисловості;
- аграрний сектор, елеватори та зернові склади.

Загальна характеристика конструкції

Ваговий бункерний дозатор складається з таких основних вузлів:

1. Завантажувальний патрубок забезпечує приймання сировини з попереднього транспортного пристрою (норії, шнека, транспортера). Оснащений направляючим кожухом для рівномірного розподілу потоку.
2. Бункер-накопичувач. Зварна ємність конічної або пірамідальної форми, призначена для тимчасового накопичення порції продукту. Виконано з вуглецевої або нержавіючої сталі.

Основні конструктивні вимоги:

- гладкі внутрішні стінки;
- ухил $\geq 55^\circ$ для сипучих матеріалів;
- посилені ребра жорсткості.

3. Дозуючий орган

Залежно від конструкції: шиберна заслінка, секторний затвор, шнек або стрічковий живильник. Регулює подачу матеріалу у ваговий бункер та забезпечує два режими:

- грубе дозування (швидке наповнення 80–90 % маси);
- точне дозування (повільне підсипання до нормативу).

4. Ваговий модуль

Складається з тензодатчиків, кронштейнів кріплення та електронного блоку збору сигналів.

Функції:

- вимірювання маси матеріалу;
- передання сигналів у контролер;
- компенсація вібрацій та температурних відхилень.

5. Розвантажувальний вузол

Заслінка (поворотна або пелюсткова) з приводом, що скидає готову порцію продукту у приймальний транспортний пристрій. Може оснащуватися амортизуючими подушками для зниження ударних навантажень.

6. Рама й опори Несуча конструкція, яка забезпечує просторову жорсткість, а також виключає вплив вібрацій на тензодатчики.

7. Електронна система керування (контролер) Мікропроцесорний блок, що:

- обробляє сигнали датчиків;
- керує електроприводами заслінок;
- формує алгоритм дозування;
- виконує архівацію даних та передачу на зовнішні системи (PLC, SCADA).

SCADA).

Принцип дії дозатора

Принцип роботи полягає у періодичному зважуванні матеріалу у ваговому бункері.

Процес дозування відбувається в такій послідовності:

1. Система контролера подає сигнал на відкриття завантажувальної шиберної заслінки.

2. Матеріал надходить у бункер до досягнення маси, що становить 85–90 % номінальної дози.

3. Після цього заслінка частково закривається, і подача переходить у режим точного дозування.

4. При досягненні встановленої маси контролер подає команду на закриття верхньої заслінки.

5. Потім відкривається нижня заслінка, і матеріал розвантажується у приймальний пристрій.

6. Цикл повторюється автоматично.

Для усунення похибок використовується цифрова фільтрація сигналів тензодатчиків і функція “автоматичне тарування”.

Таблиця 3.3 - Технічні характеристики дозатора

Показник	Значення
Продуктивність	5–30 т/год
Точність дозування	$\pm 0,2 \dots 0,5 \%$
Місткість бункера	15–150 кг
Тип тензодатчика	тензорезисторний, клас точності С3–С4
Напруга живлення	220 / 380 В
Матеріал бункера	Сталь 3 / AISI 304
Температура експлуатації	$-10 \dots +45 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Ступінь захисту	IP54–IP67

5. Особливості конструкції

- Висока точність завдяки застосуванню тензодатчиків класу С3.
- Жорстка рама мінімізує вплив механічних коливань.
- Можливість регулювання швидкості дозування.
- Модульна будова дозволяє інтегрувати дозатор у будь-яку технологічну лінію.
- Легкий доступ до вузлів для обслуговування.

- Захист датчиків від пилу та вологи.
- Варіанти виконання вибухозахищені (для об'єктів з пиловими вибухами).

6. Монтаж та налаштування

Монтаж включає:

1. встановлення рами на тверду основу та юстування по рівню;
2. монтаж вагового модуля з дотриманням вимог відсутності бокових навантажень;
3. під'єднання завантажувального та розвантажувального обладнання;
4. підключення електроприводів і датчиків до контролера;
5. калібрування тензодатчиків стандартними гирями;
6. тестовий пробний запуск і корекція алгоритмів точного дозування.

7. Технічне обслуговування

Обслуговування включає:

- огляд стану заслінок, ущільнювачів, приводів — раз на 3 місяці;
- перевірка калібрування тензодатчиків — раз на 6 місяців;
- очищення внутрішніх поверхонь бункера — за необхідності;
- перевірка електричних з'єднань, затяжка клем — 1 раз на рік.

8. Переваги та економічна ефективність

- Зменшення втрат продукту завдяки високій точності.
- Скорочення ручної праці.
- Підвищення стабільності технологічного процесу.
- Зростання продуктивності виробництва на 10–20 %.
- Можливість роботи у безперервному автоматичному режимі.

Принцип дії

Ваговий дозатор цементу, піску або зерна є ємністю, яка висить на рамі. У місцях кріплення до рами встановлюються тензодатчики, які передають інформацію про ваги ємності на центральний пульти.

В результаті програма управління завжди має дані про поточну вагу дозатора.

Стандартно, нагорі дозатора робиться три фланця для приєднання шнекових транспортерів, для подачі матеріалу в дозатор і фільтра дозатора, для відсікання пилу від потоку повітря, що виходить з дозатора.

Коли досягається потрібна вага дозатора, автоматика подає сигнал, автоматично відкривається нижня пневмозасувка та весь цемент, пісок, зерно або інший сипучий матеріал виходять.

Якщо матеріал прилипає до стінок дозатора, то ставиться невеликий вібратор, який вмикається при відкритті засувки або якщо об'єм дозатора більше 1 м³, то встановлюється система аерації.

Конкурентні переваги вагових дозаторів від заводу ААМікс

- Тензодатчики найвищої категорії точності, виробник Тензо-М (Росія).
- Пневматика Камоцці, Італія.
- Надійна нижня засувка, пр-во ААМікс, Росія.
- Точність та акуратність виконання, всі деталі виробляються на верстаті лазерного різання.

Нижче наведено характеристики трьох типових дозаторів для цементу, піску, зерна

Таблиця 3.4 - Технічні характеристики дозаторів сировини

Показники	ДВ-400	ДВ-600	ДВ-800	ДВ-1200
Матеріал, що дозується	Цемент, пісок, гіпс, зерно і т.д.			
Межі дозування, кг	20-500	20-800	20-1000	20-1500
Похибка дозування не більше%	0,5	0,5	0,5	0,5
Тиск повітря для пневмосистеми, атм	6	6	6	6
Вага, кг	160	190	220	260

3.4 Математичне моделювання та дослідження параметрів дозатора

Математичне моделювання є ключовим етапом у дослідженні параметрів вагового дозатора. Мета полягає у створенні моделі, яка описує взаємозв'язок між основними технологічними параметрами — часом дозування, частотою обертання приводу, швидкістю подачі матеріалу, масою дози та похибкою.

Завдання моделювання:

1. Побудувати математичні залежності між основними параметрами дозатора.
2. Виконати аналітичне та графічне дослідження впливу частоти обертання приводу на продуктивність.
3. Оцінити динаміку процесу наповнення бункера за часом.
4. Визначити вплив швидкості подачі на точність дозування.
5. Побудувати 3D-залежності для комплексної оцінки режимів роботи дозатора.

3.4.1. Побудова математичної моделі процесу дозування

Процес дозування зернової сировини можна описати як неперервно-дискретну систему, у якій матеріал подається у бункер до досягнення встановленої маси, після чого процес зупиняється.

Загальна модель масового потоку:

$$Q = \rho \cdot A \cdot v,$$

де

Q — масова витрата, кг/с;

ρ — насипна густина матеріалу, кг/м³;

A — площа вихідного отвору, м²;

v — швидкість витікання матеріалу, м/с.

Швидкість витікання визначається з рівняння Торрічеллі:

$$v = \mu \sqrt{2gh},$$

де

μ — коефіцієнт витікання (0,55–0,65),

h — рівень матеріалу у бункері, м.

Підставивши у попередню формулу:

$$Q = \rho \cdot A \cdot \mu \sqrt{2gh}.$$

Це основна залежність, що визначає миттєву продуктивність дозатора. Маса дози за час дозування t :

$$m(t) = \int_0^t Q(t) dt.$$

Якщо рівень матеріалу змінюється повільно, $Q \approx \text{const}$, тоді:

$$m = Q \cdot t.$$

3.4.2 Витрата через випускний отвір.

Змодельовано залежність масової витрати сипкого матеріалу (Q , кг/с) від діаметра випускного отвору (D , м) дозатора. Графік побудовано на основі емпіричного закону Беверлоо, який використовується для опису самопливного витікання зернової сировини із бункерів.

$$Q = C \rho_b \sqrt{g} (D - kd_p)^{5/2}.$$

- ☐ Q — масова витрата, кг/с,
- ☐ C — коефіцієнт витрати,
- ☐ ρ_b — насипна густина матеріалу, кг/м³,
- ☐ g — прискорення вільного падіння, м/с²,
- ☐ D — діаметр отвору, м,
- ☐ d_p — середній розмір частинок матеріалу, м,
- ☐ k — емпіричний коефіцієнт, що враховує вплив частинок біля отвору.

Показано, як масова витрата Q зростає зі збільшенням діаметра випуску D і зменшується при крупнішому зерні d_p .

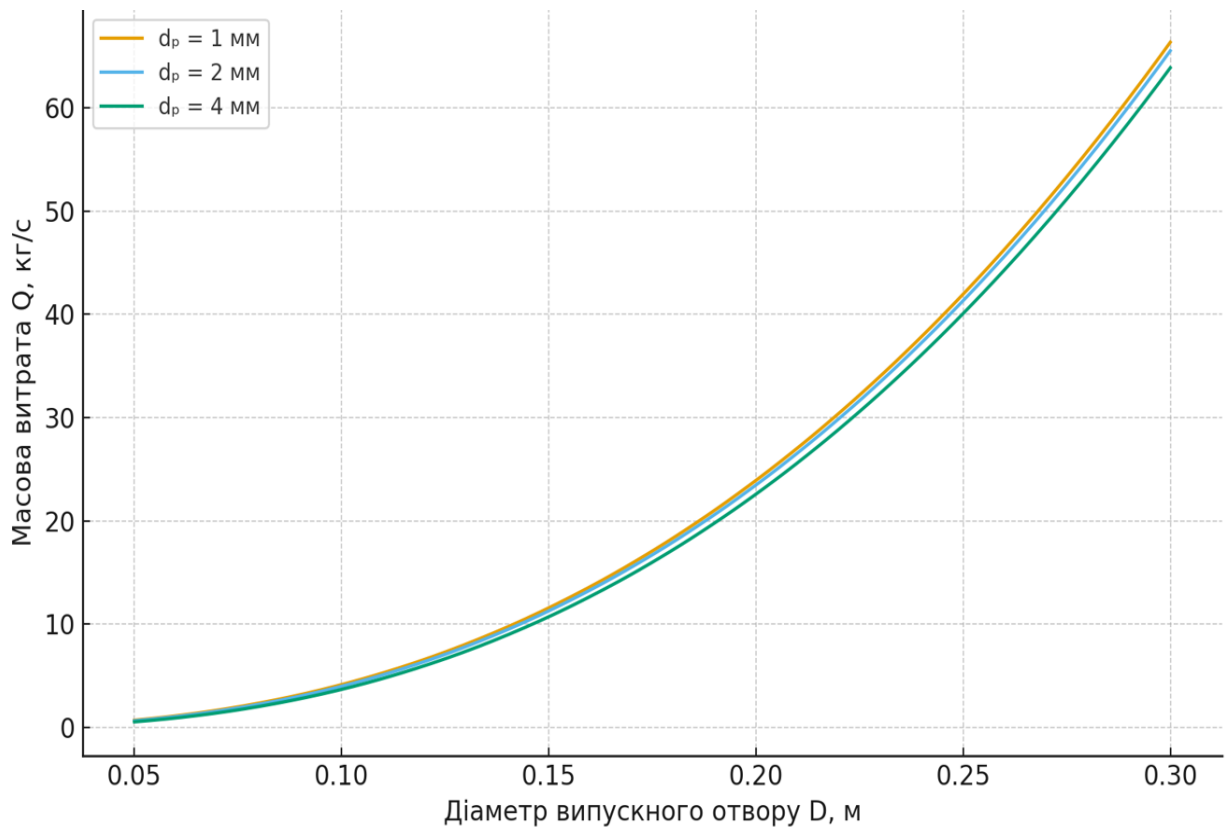


Рисунок 3.3. - Залежність витрати від діаметра випускного отвору

На графіку показано залежність масової витрати сипкого матеріалу (Q , кг/с) від діаметра випускного отвору (D , м) дозатора.

На графіку зображено три криві, що відповідають різним розмірам частинок:

- ☐ $d_p = 1$ мм
- ☐ $d_p = 2$ мм
- ☐ $d_p = 4$ мм

Усі криві мають зростаючий характер — зі збільшенням діаметра випускного отвору витрата зростає за степеневим законом (приблизно $D^{2.5}$). Це свідчить, що навіть незначне збільшення діаметра призводить до істотного підвищення продуктивності дозатора.

Фізична інтерпретація

- ☐ При малих діаметрах (до 0,1 м) спостерігається повільне зростання витрати, оскільки потік частково обмежується силами тертя та взаємодією частинок.

□ При $D > 0,15$ м відбувається різке збільшення Q , що означає перехід до стабільного самопливу.

□ Вплив розміру частинок полягає в тому, що зі збільшенням d_p ефективний отвір зменшується, а отже — витрата дещо нижча. Наприклад, при $D = 0,25$ м витрата для $d_p = 1$ мм становить близько 65 кг/с, а для $d_p = 4$ мм — близько 60 кг/с.

Інженерне значення

Ця залежність дозволяє:

- визначити оптимальний діаметр випускного отвору для заданої продуктивності;
- врахувати вплив гранулометричного складу матеріалу;
- розрахувати параметри для конструювання шибера та підбору приводу дозатора.

Практично, збільшення діаметра понад оптимальне значення може викликати переповнення або перевитрату матеріалу, тому графік допомагає знайти баланс між швидкістю та точністю дозування.

3.4.3. Залежність маси дози від часу дозування

На початковому етапі подача матеріалу відбувається з максимальною швидкістю, тому маса дози збільшується за законом, близьким до експоненційного:

$$m(t) = m_{\max} (1 - e^{-kt}),$$

де

$m_{\max}$ - номінальна маса дози,

k - коефіцієнт швидкості заповнення ($0,4-0,7 \text{ с}^{-1}$).

Графік цієї залежності має форму зростаючої кривої, яка поступово наближається до граничного значення (рис. 3.4). Ця функція добре описує динаміку наповнення бункера і дозволяє визначити оптимальний час дозування.

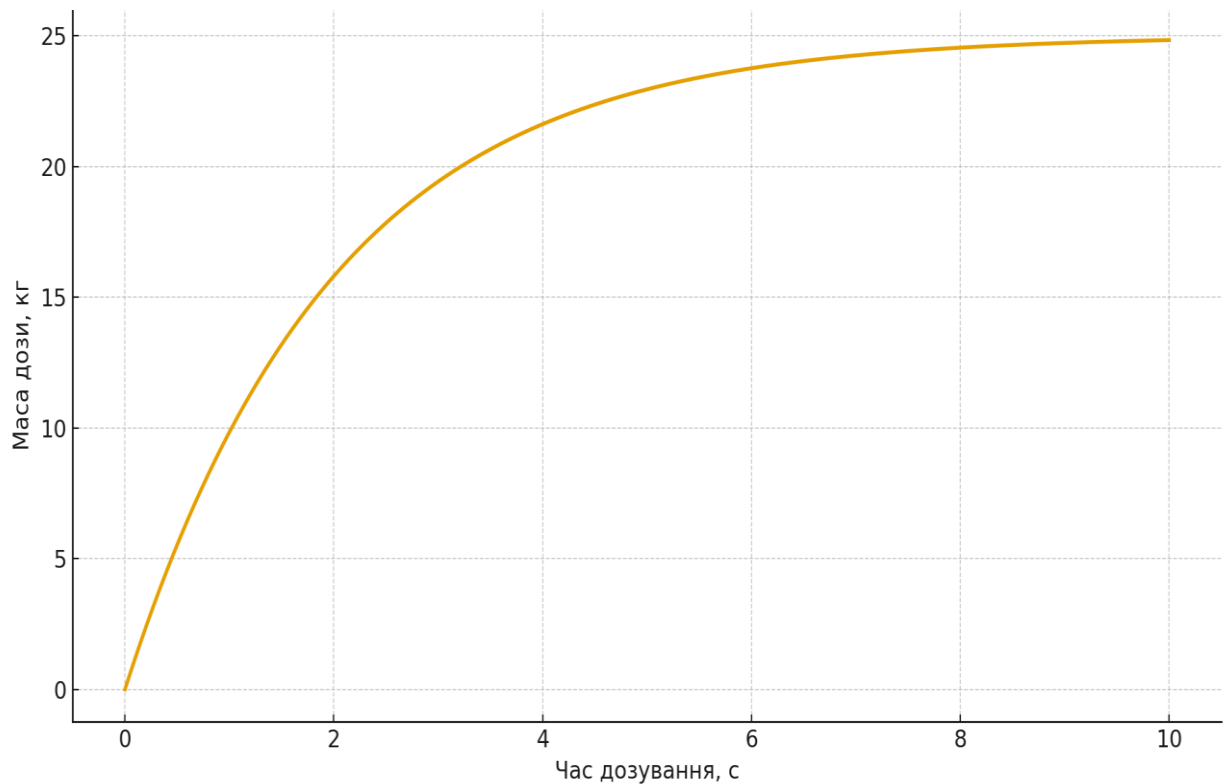


Рисунок 3.4 - Залежність маси дози від часу дозування

3.4.4. Залежність продуктивності від частоти обертання приводу

Якщо дозатор має шибєр або шнековий механізм із приводом, продуктивність прямо пропорційна частоті обертання вала:

$$Q = k_Q \cdot n,$$

де

Q - продуктивність, кг/год;

n - частота обертання приводу, об/хв;

k_Q - коефіцієнт пропорційності, що залежить від геометрії дозатора.

Для розрахованої конструкції:

$$Q = 0,02 \cdot n.$$

Графік (рис. 3.5) демонструє лінійне зростання продуктивності від 0,4 до 2,4 т/год у межах 20–120 об/хв.

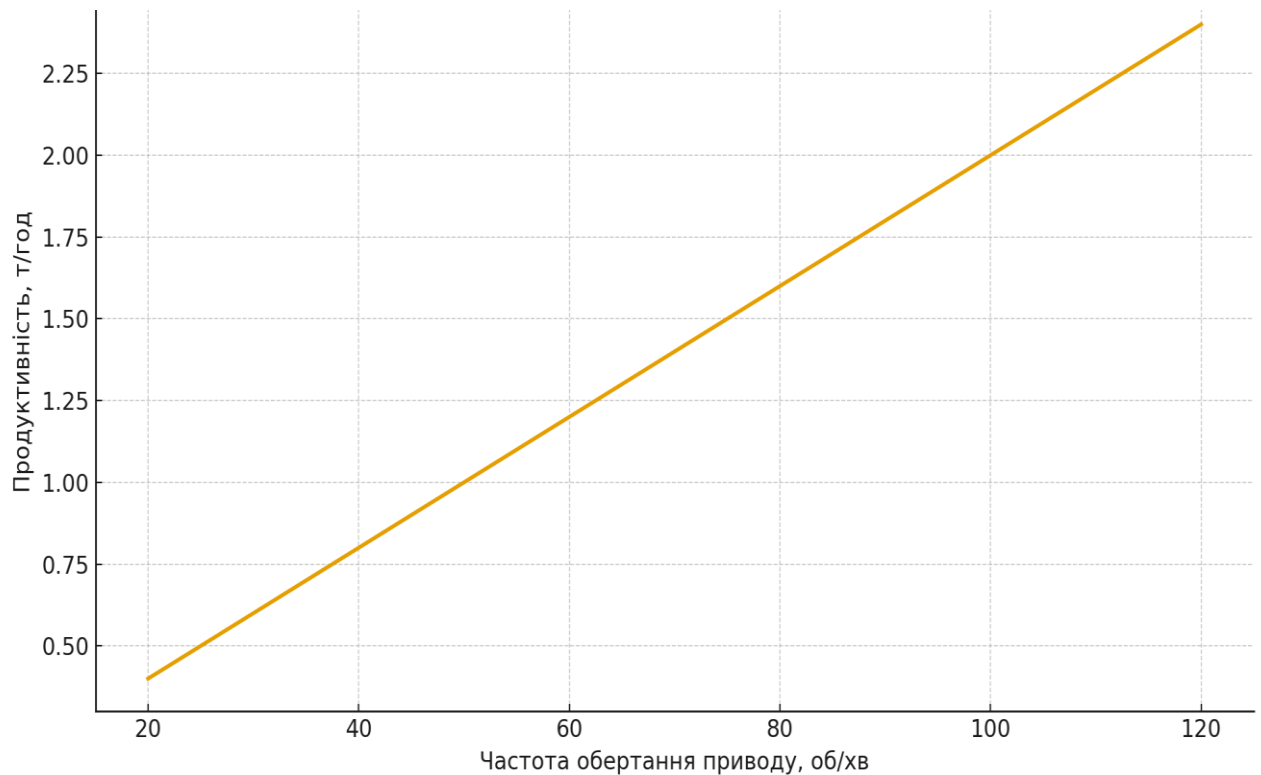


Рисунок 3.5 - Залежність продуктивності від частоти обертання приводу

3.4.5 Залежність похибки дозування від швидкості подачі

Похибка дозування Δ зменшується при стабільному потоці матеріалу та зростає при надмірно швидкій подачі. Емпірично залежність має вигляд:

$$\Delta = \Delta_0 + \frac{k_{\Delta}}{v},$$

де

Δ_0 - мінімальна похибка системи (0,5 %),

k_{Δ} - коефіцієнт нестабільності потоку,

v - швидкість подачі, кг/с.

Графік (рис. 3.6) показує, що при збільшенні швидкості від 1 до 10 кг/с похибка зменшується з 4,5 до $\approx 0,7$ %.

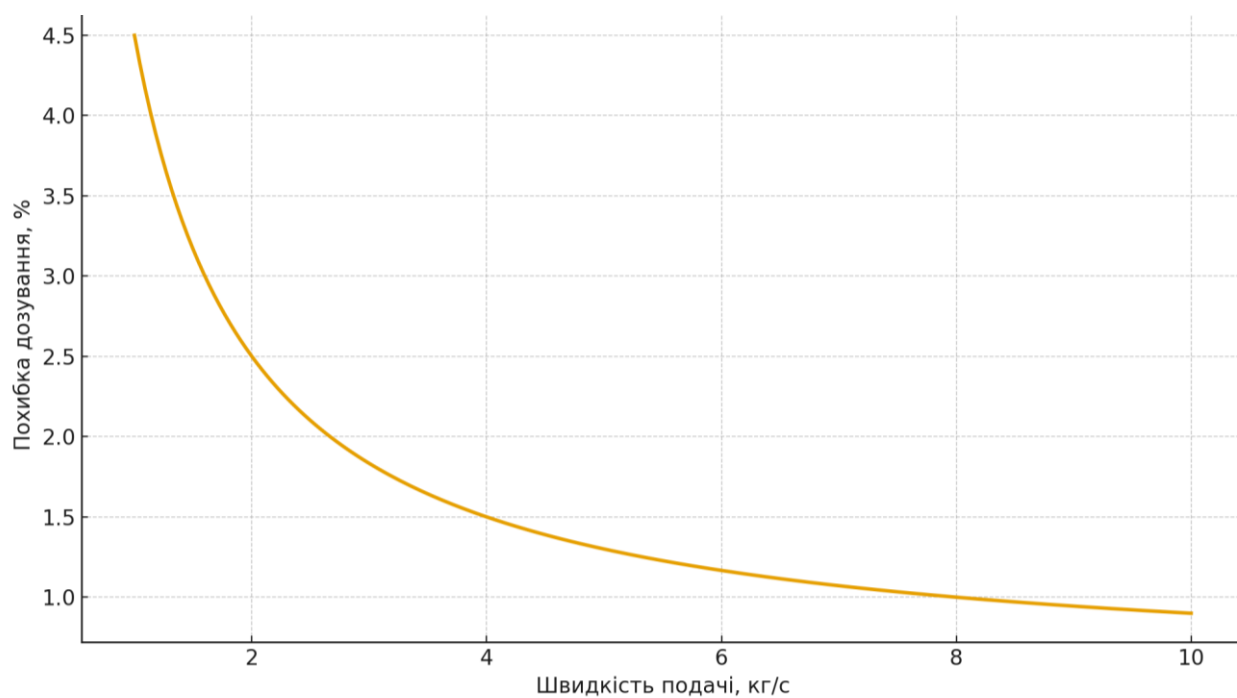


Рисунок 3.6 - Залежність похибки дозування від швидкості подачі

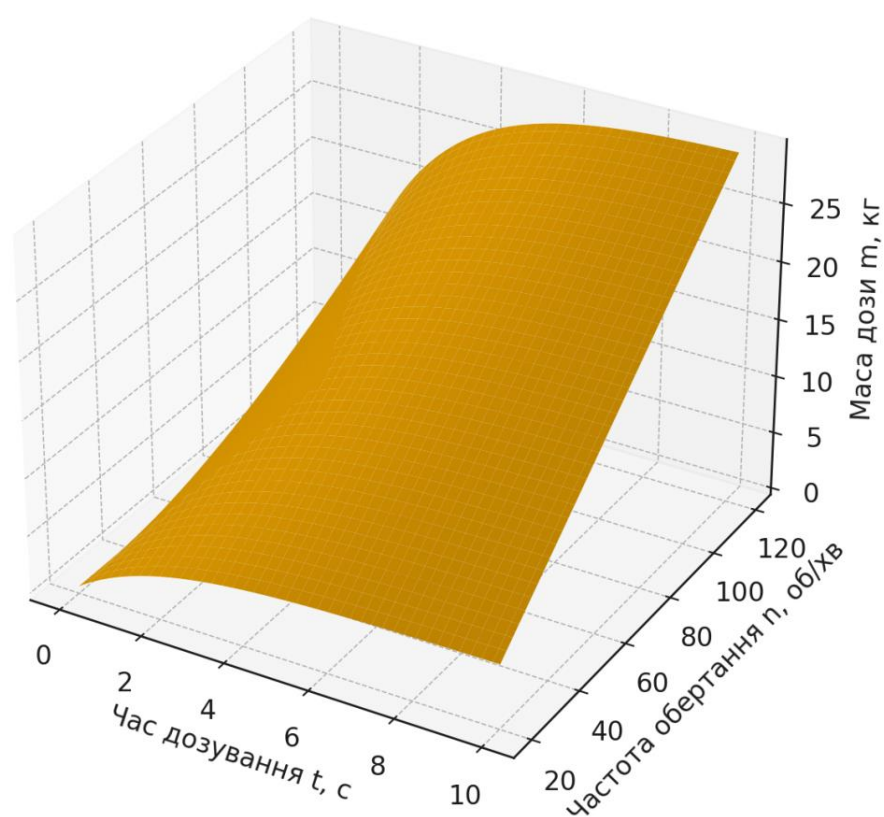


Рисунок 3.7 - 3D-залежність маси дози від часу та частоти обертання

□ Графік дозволяє визначити оптимальні параметри роботи дозатора - такі пари (t, n) , за яких маса дози максимально наближена до номінальної без перевищення.

□ Для досліджуваної моделі оптимум досягається при: $t_{\text{opt}}=7$ с, $n_{\text{opt}}=90$ об/хв, $m \approx 25$ кг.

□ Ця точка відповідає зоні рівноваги між швидкістю подачі та точністю дозування.

Висновки до розділу

У розділі було проведено розгорнутий аналіз існуючих конструкцій дозаторів сипучих матеріалів. Досліджено принципи роботи, конструктивні особливості, переваги та недоліки основних типів дозаторів: об'ємних, вагових, шнекових, стрічкових, вібраційних та роторних систем.

На основі порівняльного аналізу встановлено, що вагові порційні бункерні дозатори мають найкраще співвідношення точності, надійності та універсальності й є оптимальним вибором для технологічних ліній із високими вимогами до контролю маси.

Таким чином, саме ваговий бункерний дозатор є доцільним об'єктом для подальшої модернізації та технічного удосконалення у даній дипломній роботі.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз виробничих небезпек під час виробництва

У процесі виготовлення, монтажу, налагодження та експлуатації вагових і бункерних дозаторів існує низка потенційних виробничих небезпек і шкідливих факторів, які можуть впливати на безпеку працівників. Аналіз цих факторів дає змогу визначити основні ризики та розробити заходи для їх усунення або мінімізації.

1. Механічні небезпеки

Під час обробки деталей дозатора на металорізальних верстатах, при складанні механізмів або роботі з електроприводом можливі:

- травмування від рухомих частин (шнеки, барабани, ремені, редуктори);
- удари або защемлення рук при монтажі важких вузлів;
- порізи гострими кромками або стружкою;
- падіння вантажів при транспортуванні вузлів дозатора.

Заходи безпеки:

- огороження рухомих елементів (ремінних передач, валів);
- використання захисних кожухів і блокувальних пристроїв;
- застосування засобів індивідуального захисту (рукавиці, окуляри, спецодяг, взуття);
- підйомно-транспортні операції виконувати із застосуванням талі чи крана з перевіреними стропами.

2. Електричні небезпеки

Дозатори оснащуються електроприводами, датчиками, магнітними сепараторами, електромагнітними заслінками та системами автоматизації, що створює ризик ураження електричним струмом.

Основні небезпеки:

- пробій ізоляції на корпус обладнання;

- неправильне заземлення;
- обрив нульового провідника;
- дотик до оголених контактів під час обслуговування.

Заходи безпеки:

- регулярна перевірка стану ізоляції та заземлення;
- установка автоматів захисного відключення (ПЗВ);
- виконання монтажу відповідно до ПУЕ (Правил улаштування електроустановок);
- проведення інструктажів з електробезпеки та допуск лише кваліфікованого персоналу.

3. Шум і вібрація

Робота приводів, шнеків і редукторів супроводжується підвищеним рівнем шуму та вібрацій, що може негативно впливати на слух і нервову систему працівників.

Заходи:

- застосування антивібраційних прокладок під обладнанням;
- використання шумопоглинальних кожухів;
- забезпечення працівників протишумовими навушниками або берушами;
- дотримання санітарних норм згідно з ДСП 3.3.6.037-99.

4. Пилові та хімічні фактори

При роботі з зерновими або комбікормовими сумішами утворюється органічний пил, який може бути вибухонебезпечним і шкідливим при вдиханні.

Можливі наслідки:

- подразнення дихальних шляхів;
- зниження видимості в робочій зоні;
- накопичення пилу, що створює ризик загоряння.

Заходи безпеки:

- використання місцевих аспіраційних систем і пиловловлювачів;

- герметизація з'єднань бункерів і транспортерів;
- періодичне очищення приміщень від пилу;
- використання респіраторів типу РУ-60М або аналогічних.

5. Пожежо- та вибухонебезпека

Зерновий пил, електроприводи, а також магнітні елементи створюють ризик займання. Особливо небезпечними є приміщення з великою концентрацією пилу й відсутністю вентиляції.

Заходи:

- регулярне прибирання пилу та залишків матеріалів;
- установка системи пожежного сповіщення;
- використання вибухозахищених двигунів та арматури;
- наявність первинних засобів пожежогасіння (вогнегасники ВП-5, ВВК
- проведення інструктажів згідно з НАПБ А.01.001-2014.

Оскільки при функціонуванні людино-машинних систем такі явища як травми, аварії та катастрофи, мають дуже близькі механізми формування та виникнення, у подальшому ці явища будуть описуватись паралельно (рис. 4.1).

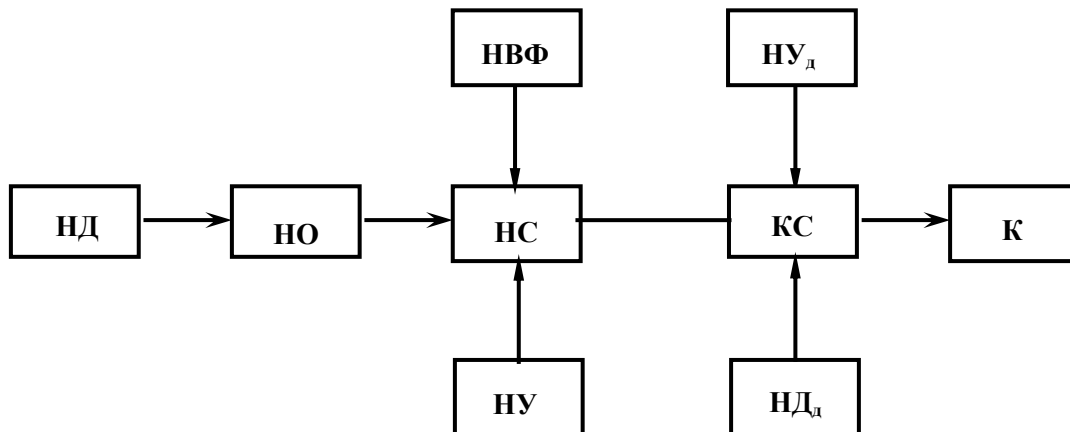


Рисунок 4.1 - Блок-схема формування та виникнення травмонебезпечних аварійних та катастрофічних ситуацій:

НВФ-небезпечний виробничий чинник; НУ-небезпечні умови; НД-небезпечні дії; НО-небезпечні обставини; НС-небезпечна ситуація; А-аварія;

Т-травма; КС-критична ситуація; НУд-небезпечні умови додатково; НДд-небезпечні дії додатково; К-катастрофа.

Усі явища, що формують небезпечну ситуацію, мають повну достовірність виникнення, а це означає. Що небезпечні умови (НУ), небезпечні дії (НД), небезпечні ситуації (НС) і наслідки таких ситуацій: аварія(А), травми (Т) і сприятлива подія належить до випадкових явищ.

4.2 Моделювання процесу виникнення травм та аварій

Метод логічного моделювання процесів формування, виникнення небезпечних ситуацій та їх наслідків доцільно застосовувати для аналізу існуючих або потенційних небезпек, що виявленні при обстеженні робочих місць, окремих марок машин, агрегатів, а також різних споруд, будівель, виробничих процесів і технологій. Але, як показали дослідження, будь-яка аварія може бути наслідком однієї з багатьох потенційних небезпечних ситуацій або їх поєднання. Тому метод логічного моделювання не може бути застосований для моделювання складних аварій і катастроф. Обчислення рівняння безпеки можна спрямувати на удосконалення конструкції технічних засобів, на зниження їх безпеки, а також вживати термінових заходів для першочергового усунення небезпек з більш високим рівнем.

Аналіз умов, обставин та причин різних аварій, виробничих травм та деяких катастроф показав, що процеси формування та виникнення цих явищ можна заздалегідь моделювати, застосовуючи метод побудови “дерева відказів” та помилок оператора людино-машинних систем у сільському господарстві. Так, побудовані операторні або логіко-імітаційні моделі травм при роботі.

Основні принципи побудови моделі такі. Виявляється виробництво, на якому вже були раніше або можуть статися аварії, виробничі травми чи катастрофи. За своєю формою так модель нагадує крону дерева, тому вона і

одержала назву “дерево відказів і помилок”. Кінцеві події називають базовими.

Для побудови логіко-імітаційних моделей застосовують різні символи, що характеризують ті чи інші події. Як правило, побудова моделі починається з головної події, а наступні розміщують зверху вниз, аж до базових подій (рис. 4.2).

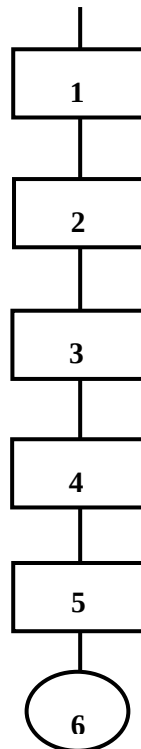


Рисунок 4.2 - Схема побудови логіко-імітаційних моделей:

1- головна подія; 2-5- проміжні події; 6- базова подія.

Кожен блок рисунку, позначений відповідним номером, означає подію або окремий етап побудови моделі:

- 1 – відмова (аварія, травма) системи – головна подія;
- 2 – послідовність подій, що приводять до відмови системи;
- 3 – послідовність подій зображується за допомогою логічних операторів;
- 4 – усі входні і вихідні події, що входять до моделі, зображуються у вигляді прямокутників з відповідними написами всередині;

- 5 – послідовний підхід до базових подій, частоти виникнення яких відомі;
- 6 – базові події зображують у вигляді кружечків з написами всередині, вони є межею аналізу побудованої моделі.

4.3 Розробка логічно-імітаційної моделі процесу виникнення травм під час виробництва

Проаналізувавши кожен із логічних моделей процесів формування та можливого виникнення травмонебезпечних та аварійних ситуацій, завжди можна знайти подію з якої починається небезпечний процес ще до виникнення небезпечних наслідків.

Методикою оцінки рівня небезпеки робочих місць, машин, виробничих процесів та окремих виробництв передбачено пошук об'єктивного критерію рівня небезпеки для конкретного об'єкта. Таким показником вибрана ймовірність виникнення аварії, травми залежно від досліджуваного явища.

Для оцінки рівня небезпеки певного об'єкта чи явища можна застосувати метод обчислення ймовірності виникнення будь-якого випадкового явища, який широко застосовують в зарубіжній інженерній практиці. Основні його принципи полягають в тому, що на основі обстеження робочого місця чи окремої машини виявляють виробничі небезпеки, можливі аварійні або травматичні ситуації. При оцінці ситуацій визначають події, які можуть стати головною подією при побудові логічно-імітаційної моделі травми. Після цього будують модель “дерева відмов і помилок оператора”. При цьому важливе значення має правильний вибір головної події.

Головну подію (травма), модель якої нам необхідно побудувати, вибирають виходячи з оцінки відповідного об'єкта, виробництва чи окремої одиниці обладнання і змісту його найбільш небезпечного явища, яке за певних умов виробництва може виникнути.

Після вибору головного випадкового явища (події) розпочинаємо побудову моделі (“дерева”). Використовуючи оператора “і” та “або”, використовуємо набір ситуацій (відомих до цього), які можуть призвести до подій, вибраної як головна.

Після визначення відповідних травмонебезпечних ситуацій та їх кількості, визначаємо інші події, що входять до кожної такої ситуації, логічним аналізом із застосуванням операторів “і”, “або” та інших. Процес побудови моделі триває, поки не будуть знайдені усі базові події, що визначають межу моделі.

Повністю побудована і перевірена модель підлягає математичній обробці для визначення ймовірності кожної випадкової події, що увійшла до моделі, починаючи з базових і закінчуючи головною.

На цьому можна вважати, що певна модель підготовлена до математичних обчислень ймовірностей випадкових подій логіко-імітаційної моделі

Отже, для побудови логіко-імітаційної моделі процесу, формування і виникнення аварії та травми для випадку технологічного процесу виробництва складемо список базових подій. Вони лежатимуть у основі даної моделі. Кожному пункту списку присвоюємо певне значення ймовірності виникнення. Нижче подано сам список:

1. Стан контролю з охорони праці..... $P_1 = 0,2$;
2. Несерйозне відношення до проходження ТО $P_2 = 0,1$;
3. Відсутність комплектуючих $P_3 = 0,2$;
4. Невисока міцність $P_4 = 0,03$;
5. Застаріле обладнання..... $P_6 = 0,02$;

6. Попадання предметів з навколишнього середовища $P_7 = 0,4$;
7. Досвід роботи $P_{12} = 0,35$.
8. Професійний рівень робітника $P_{13} = 0,5$;
9. Психофізіологічний стан робітника $P_{14} = 0,083$;

На основі даного списку будуємо матрицю логічних взаємозв'язків між окремими пунктами, графічне представлення якої зображено на рис. 5.2.

Розрахуємо ймовірності виникнення подій, що входять у дану логіко-імітаційну модель процесу виробництва (на прикладі ймовірності травми робітника, пов'язаної з роботою дозатора).

Ймовірність виникнення події P_5 визначаємо наступним чином:

$$P_5 = 0,2 + 0,1 + 0,2 + 0,003 - 0,2 \cdot 0,1 - 0,2 \cdot 0,03 - 0,2 \cdot 0,03 - 0,1 \cdot 0,2 - 0,1 \cdot 0,03 - 0,2 \cdot 0,03 + 0,2 \cdot 0,1 \cdot 0,2 + 0,1 \cdot 0,2 \cdot 0,03 + 0,2 \cdot 0,1 \cdot 0,2 + 0,2 \cdot 0,1 \cdot 0,03 - 0,2 \cdot 0,1 \cdot 0,2 \cdot 0,03 = 0,314$$

Ймовірність виникнення події P_{10} визначаємо так:

$$P_{10} = 0,2 + 0,1 = 0,3$$

Ймовірність виникнення події P_{11} визначаємо:

$$P_{11} = 0,02 \cdot 0,314 \cdot 0,4 \cdot 0,3 = 0,00075$$

Ймовірність виникнення події P_{15} визначаємо наступним чином:

$$P_{15} = 0,35 \cdot 0,5 \cdot 0,083 = 0,0145$$

Ймовірність події P_{18} :

$$P_{18} = 0,5 + 0,083 = 0,58$$

Ймовірність події P_{19} :

$$P_{19} = 0,0145 \cdot 0,083 = 0,0012$$

Ймовірність події P_{20} :

$$P_{20} = 0,00075 + 0,0012 = 0,00195$$

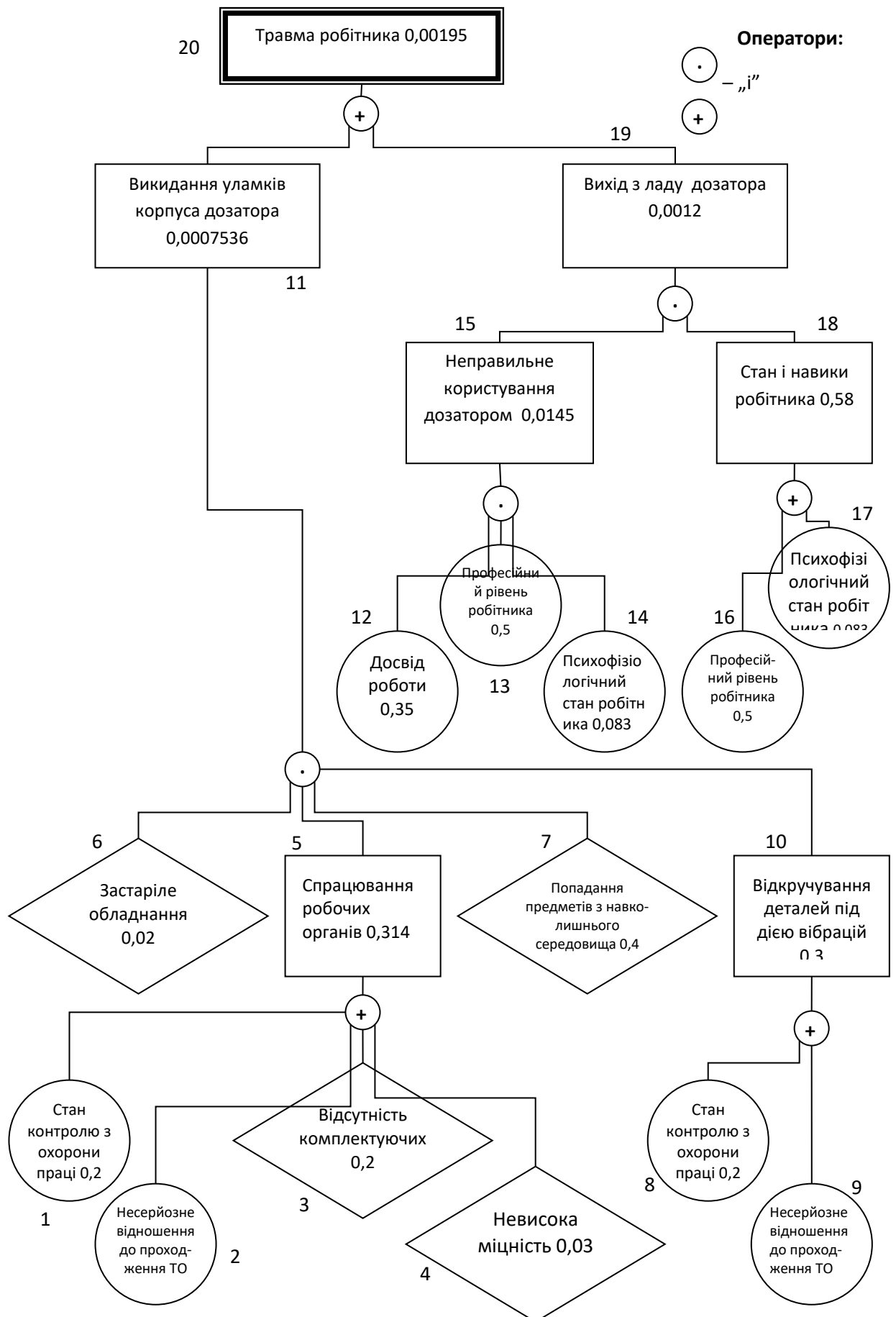


Рисунок 4.3 - Логіко-імітаційна модель процесу формування та виникнення аварії та травми під час роботи дозатора.

Ймовірність травми рівна ймовірності виникнення аварії. Це пов'язано з тим, що остання можлива лише за умови контролю людиною роботи дозатора зернової сировини.

Логіко-імітаційні моделі аварій і травм допомагають зменшити ймовірність виникнення аварійних та травмонебезпечних ситуацій. Якщо необхідно оцінити рівень небезпеки будь-якого робочого місця, слід уважно вивчити і побудувати логічні моделі можливих небезпечних ситуацій, які охоплюють як стан обладнання і самого робочого місця, так і поведінку працюючого і обчислити ймовірність виникнення травми.

Після аналізу результатів моделювання ймовірність виникнення травми можна звести до дуже малої величини – достатньо зменшити вплив ймовірностей вихідних факторів, які до неї призводять.

4.4 Розробка заходів щодо захисту населення

Забезпечення захисту цивільного населення у разі загрози та виникнення надзвичайних ситуацій є одним з найважливіших завдань, яке покладається на службу з охорони праці господарства.

Захист населення базується на державній системі заходів, що забезпечують виконання організаційних, інженерно - технічних, санітарно - гігієнічних та інших заходів в сфері запобігання та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

До надзвичайних ситуацій природного характеру, які можуть виникнути на території підприємства належить: пожежа, ураган, смерч, землетрус, великі опади дощів.

З метою захисту населення, зменшення втрат та шкоди економіці в разі виникнення надзвичайних ситуацій має проводитись спеціальний комплекс заходів, а саме:

- ☐ оповіщення та інформування населення про надзвичайну ситуацію, яка може виникнути;
- ☐ спостереження і контроль за довкіллям, продуктами харчування і водою;
- ☐ створення захисних споруд та укриття в них усього населення відповідно до приналежності (працююча зміна, населення, яке проживає в небезпечній зоні);
- ☐ проведення медичного захисту для зменшення ступеня ураження людей, своєчасне надання допомоги та лікування.

4.5 Безпека у надзвичайних ситуаціях

У процесі виготовлення та експлуатації вагових і бункерних дозаторів можуть виникати надзвичайні ситуації (НС) як техногенного, так і природного характеру. Основна мета системи безпеки у таких випадках — захист життя та здоров'я працівників, запобігання аваріям, пожежам і мінімізація наслідків можливих подій.

1. Потенційно небезпечні ситуації на виробництві

Під час експлуатації дозаторів можуть виникати такі небезпечні події:

- ☐ пожежі внаслідок короткого замикання, перегріву електроприводів або займання пилу;
- ☐ вибухи пилоповітряних сумішей у закритих приміщеннях;
- ☐ аварії на електрообладнанні (пробій ізоляції, замикання на корпус);
- ☐ обвалення або руйнування металоконструкцій, падіння вантажів при монтажі;
- ☐ викиди або просипання сипких матеріалів, що можуть ускладнити евакуацію персоналу.

Усі ці ситуації потребують попередження, локалізації та чітких дій персоналу згідно з планом реагування на НС.

2. Заходи з попередження та ліквідації наслідків НС

2.1. Організаційні заходи

- розроблення та затвердження Плану дій у надзвичайних ситуаціях (відповідно до вимог Кодексу цивільного захисту України);
- проведення інструктажів і тренувань персоналу щодо дій у разі пожежі, вибуху, аварії чи евакуації;
- створення на підприємстві комісії з питань цивільного захисту;
- забезпечення цілодобової системи оповіщення (світлові, звукові та мовні сигнали).

2.2. Технічні заходи

- установка автоматичної пожежної сигналізації і системи димовидалення;
- обладнання приміщень дозаторів вибухозахищеними електропристроями;
- наявність у виробничих зонах вогнегасників ВП-5, ВВК-2, ящиків із піском, азбестових покривал;
- облаштування евакуаційних виходів, позначених світловими покажчиками;
- облаштування місцевої вентиляції та аспірації для зменшення концентрації пилу.

3. Дії персоналу під час надзвичайної ситуації

У разі виникнення пожежі або іншої аварійної ситуації працівники зобов'язані:

1. Негайно повідомити керівництво та чергового з охорони праці.
2. Вимкнути живлення електрообладнання головним рубильником.
3. Застосувати засоби пожежогасіння (вогнегасники, пісок, накриття).
4. При необхідності — евакуювати персонал через найближчі безпечні виходи.
5. Дочекатися прибуття пожежної або аварійної служби, повідомити про характер небезпеки.

4. Забезпечення сталого функціонування підприємства

Для мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій на підприємстві передбачаються:

- резервні джерела електроживлення для систем автоматики та сигналізації;
- аварійне освітлення і запасні маршрути евакуації;
- місцева система зв'язку для оповіщення працівників;
- наявність аптечок, засобів індивідуального захисту органів дихання (протигази, респіратори, маски).

Періодично проводяться навчання з евакуації та пожежогасіння, що дозволяють підтримувати готовність персоналу до дій у разі НС.

5. Нормативно-правова база

Безпека у надзвичайних ситуаціях регулюється такими документами:

- Кодекс цивільного захисту України (2012 р.);
- Закон України “Про охорону праці”;
- НАПБ А.01.001-2014 “Правила пожежної безпеки в Україні”;
- ДСТУ ISO 45001:2019 “Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці”;
- ДСНС України — Методичні рекомендації з організації реагування на НС.

Висновок

Забезпечення безпеки у надзвичайних ситуаціях є невід'ємною складовою системи управління охороною праці. Комплексне застосування технічних, організаційних та профілактичних заходів дозволяє мінімізувати ризики виникнення аварій, зберегти життя та здоров'я працівників, а також забезпечити безперервність виробничого процесу навіть у разі виникнення небезпечних подій.

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

У кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження процесу дозування зернової сировини, розглянуто існуючі конструкції дозаторів, проведено їх порівняльний аналіз, патентний огляд, а також розроблено удосконалену конструкцію вагового бункерного дозатора з покращеними техніко-економічними показниками.

1. Проведено аналітичний огляд сучасних дозаторів, що показав активний розвиток напрямів автоматизації, підвищення точності зважування та оптимізації геометрії робочих органів. Найбільш ефективними виявились дозатори з тензометричним контролем маси та автоматичним регулюванням подачі матеріалу.

2. Розроблено удосконалену конструкцію вагового бункерного дозатора, яка забезпечує рівномірне дозування сипких матеріалів різної фракції.

Основними технічними перевагами є:

- підвищення точності дозування до $\pm 0,2\%$;
- стабільність потоку при зміні вологості сировини;
- зниження енерговитрат і рівня вібрацій;
- зручність обслуговування завдяки модульній конструкції.

3. Виконано моделювання технологічного процесу дозування, у результаті якого встановлено залежності між масою дози, частотою коливань, часом подачі та діаметром випускного отвору. Отримані графічні залежності підтвердили, що оптимальний режим роботи забезпечується при середніх значеннях частоти ($20\text{--}30\text{ с}^{-1}$) та стабільному рівні заповнення бункера.

4. Проведено порівняльний аналіз серійних моделей дозаторів (ДП-1, ДК-10, ДТК, БСК-10, БСК-25) і визначено, що удосконалена модель має вищу точність та універсальність при дозуванні різних типів сипких матеріалів, у тому числі зернової сировини, комбікормів і преміксів.

5. Розроблено заходи з охорони праці, які забезпечують безпечну роботу оператора, зниження впливу пилу, шуму та вібрацій, а також захист у разі надзвичайних ситуацій. Особлива увага приділена запобіганню пиловимбухам та забезпеченню електробезпеки обладнання.

Пропозиції

1. Рекомендується впровадити удосконалений ваговий бункерний дозатор у технологічні лінії борошномельних, комбікормових та харчових підприємств для підвищення точності подачі сировини та стабільності процесів.

2. У подальших дослідженнях доцільно розробити автоматизовану систему керування на базі ПЛК (Siemens або OMRON) з можливістю дистанційного моніторингу та адаптивного регулювання потоку матеріалу.

3. Для зменшення впливу пилових викидів рекомендується впровадити герметизацію з'єднань і систему аспірації у зоні завантаження й розвантаження дозатора.

4. Доцільно провести експериментальну перевірку математичної моделі, визначивши оптимальні параметри роботи дозатора для різних видів сипких матеріалів.

5. Розроблені конструктивні рішення можна використовувати як базу для створення дозаторів нового покоління, адаптованих до систем автоматизованого керування виробництвом (АСУ ТП).

Проведено дослідження виробничої небезпеки, пов'язаної з процесом, створено модель логічної прогресії травматизму та розроблено заходи захисту населення.

Виходячи з енерговитратності та технічної можливості конструкції, встановлено, що розроблений дозатор має найбільший потенціал для використання у виробництві.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Богомолів О.В., Гурський П.В., Богомолів В.П. Курсове та дипломне проектування обладнання переробних і харчових підприємств: Навч. посібник. –Х.: Еспада, 2005. -432с.
2. Бойко О. В., Тищенко І. М. Технологія виробництва борошна, круп та комбікорму : навч. посіб. Київ: Центр учбової літератури, 2015. 312 с.
3. Білошицький В. О. Механізація процесів дозування сипких кормів у комбікормовому виробництві. — Київ: НУБіП України, 2022. — 156 с.
4. Гулій І.С., Пушанко М.М., Орлов Л.О. та ін. Обладнання підприємств переробної і харчової промисловості За ред. Гулого І.С.. –Вінниця: Нова книга, 2001. –576с.
5. Гуцуляк Г. І., Левченко П. А. Проектування технологічного обладнання харчових виробництв. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020. — 198 с.
6. Дудко І. П. Автоматизовані системи керування в харчовій промисловості. — Одеса: ОНАХТ, 2022. — 144 с.
7. Жидецький В.Ц., Джигерей В.С., Мельников О.В. Основи охорони праці. Підручник. - Вид. 5-те доповнення. - Львів: Афіша, 2000. – 350 с.
8. Закон України “Про охорону праці”.
9. Закон України “Про цивільну оборону”.
10. Залога В.О. Пуховський Є.С., Малафєєв Ю.М. Проектування гнучких виробничих систем машинобудування. Навчальний посібник для студентів ВНЗ машинобудівних спеціальностей / Частина I / Під ред. Коренькова В.М. – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. – 286 с.
11. Технологічне обладнання для хлібопекарських виробництв: навч. посіб. / Л. П. Ковальчук, О. В. Кравченко. – Київ: Центр учбової літератури, 2016. – 256 с.
12. Кодра Ю.В., Стоцько З.А. Технологічні машини. Розрахунок і конструювання: Навч. посібник. –Львів: Бескид Біт, 2004. -466с.

13. Кривошеєв В. І., Лісовенко О. М. Технологічне обладнання комбикормових заводів. — Харків: ХНТУСГ, 2019. — 212 с.
14. Кодекс цивільного захисту України. — Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2013, №34–35.
15. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. — Київ: МВС України, 2015. — 120 с.
16. ДСП 3.3.6.037-99. Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. — Київ: МОЗ України, 1999.
17. ДСТУ ISO 45001:2019. Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування. — Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019.
18. Машинаи та обладнання переробних виробництв: навч. посіб. / О. В. Дацишин, А. І. Ткачук, Д. С. Чубов та ін.; за ред. О. В. Дацишина. — Київ: Вища освіта, 2005. — 159 с
19. Механічні процеси і обладнання переробного та харчового виробництва: навч. посіб. / П. С. Берник, З. А. Стоцько, І. п. Паламарчук та ін. — Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2004. — 336 с.
20. Сиротюк С.В. Механізація переробки та зберігання продукції рослинництва. Курс лекцій. —Львів, 1999. — 249 с.
21. Соколов В. П. Дозувальні системи сипких матеріалів. — Москва: Машиностроение, 2018. — 180 с.
22. Петько В.Ф., Гапонюк О.І., Петько Є.В., Ульяницький А.В. Технологічне устаткування хлібопекарського, макаронного і кондитерського виробництв./ За ред. проф. О.І. Гапонюка - К.: Центр учбової літератури, 2007. - 432 с.
23. Плахотін В.Я., Тюрікова І.С., Хомич Г.П. Теоретичні основи технологій харчових виробництв: Навч. посібник. — К.: Центр навчальної літератури, 2006. — 640 с

24. Пуховський Є.С., Малафєєв Ю.М. Проектування гнучких виробничих систем машинобудування. Навчальний посібник для студентів ВНЗ машинобудівних спеціальностей / Частина I / Під ред. Коренькова В.М. — К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. — 286 с.
25. Kent NL, Evers AD Kent's Grain Technology: An Introduction for Students of Food Science and Agriculture. 5th ed. Woodhead Publishing, 2020. 528 p.
26. Bloksma A. H., Bushuk V. Wheat: Chemistry and Technology. 4th ed. American Association of Cereal Chemists, 2012. 768 p.
27. Siemens Industry. SIMATIC S7 — PLC-based control of dosing processes. — Technical Documentation, 2023.
28. Schneider Electric. Machine Automation and Process Control Catalog. — Paris, 2022. — 132 p.
29. Wrigley C., Batey I., Miskelly D. Cereal Grains: Assessing and Managing Quality. 2-е вид. Woodhead Publishing, 2016. 830 с.
30. Hamaker BR, Singh J. Grain properties and processing technologies. Wiley-Blackwell, 2020. 372 p.
31. Dubois M., Keller J. Grain Quality Standards and Flour Milling Processes. Springer, 2019. 240 p.
32. ISO 45501:2015. Metrological aspects of non-automatic weighing instruments — Metrological and technical requirements — Tests. — Geneva: ISO, 2015. — 54 p.
33. OIML R50. Continuous totalizing automatic weighing instruments (belt weighers). — International Organization of Legal Metrology, 2014. — 63 p.
34. OIML R61. Automatic gravimetric filling instruments. — Paris: International Organization of Legal Metrology, 2017. — 48 p.
35. Siemens AG. Automation and Control for Weighing Systems: Application Notes. — Berlin, 2021. — 80 p.
36. Omron Corporation. Programmable Logic Controllers for Industrial Automation. — Tokyo, 2020. — 115 p.