

**ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Факультет інженерно-технологічний**  
**Кафедра механічної та електричної інженерії**

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

*магістр*

на тему: «Дослідження конструктивно-технологічних параметрів  
бункера-дозатора органічних добрив»

КРМ.133ГМмд\_21.24.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти  
за освітньо-професійною програмою  
*«Машини і засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва»*  
спеціальності 133 «Галузеве  
*машинобудування»*  
ступеня вищої освіти *магістр*  
групи 133ГМмб\_21  
ЦИБУЛЬКО Володимир

Керівник: канд. техн. наук, доц.  
ПОПОВ Станіслав

**Полтава – 2023 року**

## ВСТУП

Досягнення мікробіології починають широко застосовуватися під час сільськогосподарського виробництва. Мова йде про розвинені країни світу. Окрім того, дана практика набуває поширення і у нашій країні. Загальновідомим фактом є те, що мікроорганізми суттєво впливають на зростання рослин, а також призводять до підвищення рівня урожайності. За рахунок використання біологічних препаратів фахівці можуть впливати на їх концентрацію, місце та час застосування.

Суттєвим недоліком зазначеної вище технології активації є те, що для виготовлення та обробки гранульованих добрив потрібні високовартісні технології, а також засоби механізації технологічних процесів. Існуючі конструкції обладнання є далеко не досконалими та потребують подальшого удосконалення за рахунок конструктивної модернізації на підставі ґрунтовних досліджень процесів супроводу.

Як бачимо, актуальним науково-технічним завданням є широке впровадження засобів механізації для забезпечення виготовлення кінцевого продукту. Ці засоби повинні володіти рядом властивостей, серед яких продуктивність, енергоефективність, низький рівень матеріалоємності та собівартості, ремонтпридатність та ін.

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 1.1 Властивості мінеральних добрив

Для того, щоб виконати якісне змішування мінеральних добрив потрібно знати основні фізико-хімічні і механічні властивості. Нижче описана характеристика основних властивостей добрив:

- вологість;
- гігроскопічність;
- злежуваність;
- гранулометричний склад;
- міцність гранул;
- кут природнього відкосу;
- щільність.

### 1.2 Аналіз дозаторів для добрив

Дозатори виконують роль механічних пристроїв, для створення рівномірної коригованої течії матеріалу з бункеру та випуск вимірної частини (дозы) сипучого матеріалу. Відмірювання може бути виконане за об'ємом або за масою.

У сучасному світі масово застосовується чималий різновид типів з різним технічним виконанням дозаторів, кожен із яких має свої досягнення при певних умовах роботи і способу вивантаження. Але все ж таки універсального багатофункціонального рішення не існує. Пристрій дозування обирають у кожному окремому випадку в залежності від властивостей сипучого матеріалу, подачі та виробничих характеристик.

Особливі типи дозаторів використовують не лише, як незалежний пристрій, але й у спільній роботі з іншими пристроями для дозування, що надає можливість виконати складне дозування деяких інгредієнтів. У них є великий потенціал при

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

встановленні у потокові лінії [1-4].

У результаті проведення огляду відомих конструкцій і режимів роботи, допустимо систематизувати дозатори сипучих матеріалів постійної дії за принципом роботи на основні типи:

- з тяговим органом (в якості робочого органу спіральна стрічка, пластини, скребки і т. п.);
- з робочим органом, що крутиться (шнек, диск);
- з робочим органом, що коливається (вібраційні і т.п.);
- пневматичні, працюють за принципом насичення сипучого матеріалу повітрям; при цьому сипучий матеріал збігає із похилого лотку, що розміщують під бункером, як рідина.

Слід відмітити, що бункер може і не мати дозатора. В цьому випадку дозування відбувається за рахунок вільного руху матеріалу через відкритий отвір на дні бункера з заслінкою.

Розглянемо основні типи дозаторів, що представлені на рисунку 1.1.

Рисунок 1.1 – Основні типи дозаторів

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

Стрічковий (рисунок 1.1, а) – для стабільного дозування сипучих матеріалів і дозування виконується за рахунок зміни товщини шару матеріалу за допомогою вертикальної заслінки або швидкості стрічки.

Пластинчатий (рисунок 1.1, б) – для стабільного дозування важких, великих, абразивних матеріалів. Дозування виконується аналогічно стрічковому типу.

Гойдальний (рисунок 1.1, в) – призначений для відмірювання з ємності сипучих матеріалів з насипною щільністю до  $2,6 \text{ т/м}^3$ . Вони прості за конструкцією, мають високу надійність і продуктивність, дозування відбувається за рахунок зміни ходу лотка.

Вібраційний (рисунок 1.1, г) – для дозування твердих і зернистих сипучих матеріалів, також використовують спонукач, для вивантаження важкосипучих матеріалів, схильних до утворення арок та налипання над випускним отвором. Зміна порції може забезпечити автоматичну зміну діапазону амплітуди та частоти вібрації жолобу.

Тарілчастий (рисунок 1.1, д) – для дозування твердотілих, сипучих та плоскосипучих матеріалів з насипною щільністю до  $2,5 \text{ т/м}^3$ , функціонує під тиском матеріалу з бункеру, подача змінюється за рахунок зміни позиції заслінки та частоти обертання робочого органу.

Гвинтовий (рисунок 1.1, е) – для дозування пилоподібних, зернистих, дрібнокускових вантажів. Регулювання за рахунок зміни частоти гвинта та переміщення заслінки.

Барабанний (рисунок 1.1, ж) – для дозування низькосипучих зернистих та дрібних матеріалів з хвилястою поверхнею циліндра для крупних матеріалів. Подача пропорційна перерізу висоти шару матеріалу та частоті обертання барабану.

Ланцюговий (рисунок 1.1, з) – для дозування твердотілих однотипних матеріалів, подача залежить від частоти обертання зірочки.

Лопатевий (рисунок 1.1, і) – для дозування порошкоподібних матеріалів з високою щільністю. Подача залежить від частоти обертання лопать [5-7].

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Дозатор шнековий (рисунок 1.2) сконструйований для відміреного випуску невологих, добресипучих матеріалів. Зміна дозування відбувається за рахунок зміни частоти живильного струму електродвигуна. Електродвигун має загальний привод з валами ворошилки і шнеку. За допомогою обертання ворошилки відбувається обвал арок сипучого матеріалу [8].

Рисунок 1.2 – Дозатор шнековий: 1 – корпус шнека; 2 – шнек; 3 – бункер;  
4 – ворошилка; 5 – рама; 6 – привод

Споживана потужність електродвигуна 1,1 кВт, довжина кожуха шнека 1400 мм, діаметр дозуючого робочого органу 46 мм, крок гвинтової лінії 30 мм, швидкість обертання робочого органу  $6,5..65 \text{ хв}^{-1}$ , місткість бункера 48 л, габаритні розміри  $2110 \times 520 \times 480 \text{ мм}$ , маса 70 кг.

Недоліками даного дозатору є те, що при використанні важкосипучих матеріалів відбувається зависання матеріалу над ворошилкою, утворення склепіння над шнеком та прилипання до стінок бункера сипучого матеріалу.

Електровібраційний дозатор DR 50/450 (рисунок 1.3) малої продуктивності успішно використовується для дозування невеликої кількості сипучого матеріалу. Дозування регулюється положенням бункера за висотою відносно лотку, змінюється пересуванням його направляючих задньої стойки з послідуєчим закріпленням гвинтом.

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Продуктивність даного дозатору складає до 0,75 м<sup>3</sup>/год., об'єм бункера 9 дм<sup>3</sup>, маса з бункером складає 18,5 кг, габаритні розміри 450×98×590 мм [3].

До недоліків електровібраційного дозатора слід віднести високу похибку порцій дозування. Він не використовується для важкосипучих матеріалів, при застосуванні порошкоподібних та шпилеподібних матеріалів відбувається пилення.

Рисунок 1.3 – Електровібраційний дозатор DR 50/450:

1 – вібраційний лоток; 2 – станина; 3 – опорний корпус лотка; 4 – вібратор;  
5 – задня стійка; 6 – напрямна; 7 – гвинт; 8 – бункер

Шнековий дозатор MechaTron Coni-Steel (рисунок 1.4) широко використовується для постійної подачі важкосипучих матеріалів.

Сипучий матеріал витікає з конічного бункеру в кожух, при цьому енергійно обертається завдяки ворошильці. Зміна подачі виконується шляхом зміни швидкості обертання шнеку.

Подача даного дозатору складає 0,16..30 дм<sup>3</sup>/год., діаметр робочого органу 13 мм, енергоспоживання 0,12 кВт, об'єм бункеру 14 дм<sup>3</sup> [9].

Недоліком даного дозатору є утворення склепіння над шнеком та налипання сипучого матеріалу між бункером та ворошилкою.

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Рисунок 1.4 – Шнековий дозатор MechaTron Coni-Steel:

1 – шнек; 2 – рама; 3 – електродвигун шнека; 4 – конічний бункер;  
5 – ворошилка; 6 – редуктор; 7 – електродвигун ворошилки

**Висновки до розділу 1**

1 У сільському господарстві широко використовують різні пристрої для дозування сипучих матеріалів.

2 Аналіз існуючих пристроїв дозування добрив показав, що вони не відповідають заданим вимогам, не є універсальними, мають складну конструкцію.

3 Технічні засоби зі спіралью-гвинтовими робочими органами можуть стати основою для створення пристроїв для дозування сипучих матеріалів. Дозволяють знизити енергоємність, матеріалоємність, виходячи з цього вартість конструкції і використання їх у виробництві.

Виходячи з вищевказаного слідує, що дана тема є актуальною, має практичну та наукову цінність.

Отже, **мета дослідження** – підвищення ефективності подачі добрив за рахунок розробки комбінованого бункер-дозатора із обґрунтуванням його конструктивно-режимних параметрів. **Об’єктом** розробки є технологічний процес

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

дозування добрив, а **предметом** – закономірності взаємодії спірального-гвинтового дозуючого органу дозатора із робочим середовищем.

Для вирішення поставленої мети необхідно розв'язати наступні **задачі**:

- запропонувати конструктивно-технологічну схему дозатора органічних добрив;

- отримати рівняння подачі спірального-гвинтового дозатору з врахуванням фізико-механічних властивостей добрив і конструктивно-режимних параметрів дозатору;

- представити методику визначення подачі та похибки дозування спірального-гвинтового дозатору та обробки отриманих даних;

- запропонувати методику визначення фізико-механічних властивостей сипучих матеріалів;

- визначити продуктивність дозатору, похибку дозування, а також отримати залежності подачі при різних діаметрах робочого органу та кожуху від частоти обертання;

- визначити фізико-механічні властивості сипучого матеріалу, а саме насипну щільність, вологість, початковий опір зсуву, кут внутрішнього тертя, коефіцієнт внутрішнього тертя, коефіцієнт внутрішнього зсуву, кут справжнього укосу, коефіцієнт сипучості (рухомості);

- приділити увагу питанням економічної ефективності, охорони праці та захисту довкілля.

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

## РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Конструктивно-технологічна схема дозатора добрив

Бункер-дозатор (рисунок 2.1) складається з бункера 1, на якому встановлений вібратор 2, а знизу розташований спірально-гвинтовий дозуючий орган 3. Останній розташований у кожусі 4, на одному кінці якого виконано вивантажне вікно 5. Привод дозуючого органу 3, здійснюється від двигуна 6 за допомогою гнучкої муфти 7. Бункер 1 з'єднаний з кожухом 4 гнучкою муфтою 8. Бункер встановлений на пружинах 9. У верхній частині бункера 1 розміщена перемичка 10, на якій за допомогою шарніру 11 вертикально по центру випускного отвору встановлено стрижень 12.

Рисунок 2.1 – Бункер-дозатор

Бактеріальні добрива також захоплюються витками дозуючого органу і рухаються по кожуху в бік вивантажувального вікна. Мінеральні добрива, переміщуючись під вивантажувальним вікном дозатору, змішуються з бактеріальними добривами, що потрапляють із дозатора.

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

## 2.2 Визначення подачі спірально-гвинтового дозатору

Дозатори – це технічні пристрої для подачі стабільної регульованої маси завантаження (об'єму) різних матеріалів із бункеру і видачі певної порції дози (об'єму) матеріалу. Дозування може відбуватися за об'ємом або масою.

На даний час широко використовується різноманітні конструктивні виконання дозаторів, кожен з яких має переваги при заданих умовах експлуатації та організації навантаження, проте універсального функціонального рішення не існує. У кожному окремому випадку надають перевагу тому чи іншому типу дозатору, в залежності від характеристик матеріалу, що транспортується, потужностей та виробничих ситуацій. Розглянемо в даному випадку спірально-гвинтові дозатори, які часто використовуються у сільськогосподарському виробництві.

У загальному випадку, при визначенні подачі спірально-гвинтового дозатору використали формулу, рекомендовану в роботі [10]. Вона залежить від різних факторів: фізико-механічних властивостей матеріалу, кутів тертя, кутів нахилу траси, розміру кожуха і робочого органу, швидкості обертання робочого органу і т. д. В основному використовують формулу (2.1) для розрахунку подачі матеріалу:

$$Q = K_f K_v F_p v_{zm} \rho, \quad (2.1)$$

де  $K_f$  – коефіцієнт заповнення кожуху сипучим матеріалом;

$F_p$  – робоча площа поперечного перерізу кожуха, м<sup>2</sup>;

$K_v$  – коефіцієнт осьового відставання;

$v_{zm}$  – осьова швидкість руху сипучого матеріалу, м/с;

$\rho$  – щільність сипучого матеріалу, кг/м<sup>3</sup>.

Робоча площа поперечного перерізу кожуха:

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

$$F_p = \frac{\pi}{4} \left( D^2 - \frac{\delta^2}{\sin \alpha} \right), \quad (2.2)$$

де  $D$  – внутрішній діаметр кожуха, м;

$\delta$  – діаметр дроту спіралі, м;

$\alpha$  – кут підйому витків спіралі, град.

Кут підйому витків спіралі:

$$\alpha = \arctg \left( \frac{S}{\pi d_{cp}} \right), \quad (2.3)$$

де  $S$  – крок навивки, м;

$d_{cp}$  – середній діаметр спіралі, м.

$$d_{cp} = d - \delta, \quad (2.4)$$

де  $d$  – зовнішній діаметр спіралі, м.

Тоді:

$$\alpha = \arctg \left( \frac{S}{\pi(d - \delta)} \right), \quad (2.5)$$

Підставимо формулу (2.1) в (2.5) і перетворимо:

$$F_p = \frac{\pi}{4} \left( D^2 - \frac{\delta^2 \pi (d - \delta) \sqrt{1 + \frac{S^2}{\pi^2 (d - \delta)^2}}}{S} \right). \quad (2.6)$$

Середню швидкість перемішування сипучого матеріалу знаходять, як при розрахунку тихохідної умови переміщення, при якій приймається, що осьова швидкість сипучого матеріалу відповідає осьовій швидкості спірального гвинта. Але при цьому не враховують, що при переміщенні сипучого матеріалу частина його пересипається через витки спірального гвинта, в результаті виникає відставання сипучого матеріалу від осової швидкості спірального гвинта. При подальшому розрахунку слід приймати коефіцієнт осового відставання сипучого матеріалу, він розраховується із експериментальних досліджень [11, 12].

Дослідимо рух сипучого матеріалу при обертанні спірального гвинта. Аналіз транспортування сипучого матеріалу спірально-гвинтовим робочим органом показує, що об'єм сипучого матеріалу, що перебуває між витками в поздовжньому перерізі, нахилений до горизонталі під кутом  $\beta$  природного укосу (рисунок 2.2).

Рисунок 2.2 – Розташування сипучого матеріалу в спірально-гвинтовому дозаторі

Прийmemo, що вільна поверхня сипучого матеріалу прямолінійна, визначимо осьову швидкість руху сипучого матеріалу. Згідно з епюрою швидкостей (рисунок 2.3) осьова швидкість:

$$v_{zn} = \frac{v_{zn} \delta + 0,5v_{zn} (h - \delta)}{h} = \frac{v_{zn}}{2h} (h + \delta), \quad (2.7)$$

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

де  $v_{zn}$  – осьова швидкість спіралі, м/с;

$h$  – максимальна висота сипучого матеріалу, м.

Рисунок 2.3 – Епюра розподілу швидкостей сипучого матеріалу

Осьова швидкість спіралі:

$$v_{zm} = Sn, \quad (2.8)$$

де  $n$  – частота обертання спіралі,  $\text{хв}^{-1}$ .

У процесі обертання спірального гвинта переміщується частина сипучого матеріалу, який має в поперечному перерізі форму кільця товщиною  $h$ , площа якого:

$$A_m = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi(D^2 - 2h)^2}{4} = \pi h(D - h). \quad (2.9)$$

Звідки,

$$h^2 - Dh + \frac{A_m}{\pi} = 0. \quad (2.10)$$

З формули (2.10) визначимо  $h$ :

$$h_{1,2} = \left( D \pm \sqrt{D^2 - \frac{4A_m}{\pi}} \right) / 2. \quad (2.11)$$

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

У дослідженнях спірально-гвинтових робочих органів зазначається, що в більшості дослідних даних, коефіцієнт заповнення кожуха  $K_f \leq 0,5$ . Отже,  $h \leq D/2$ . Тому визначимо:

$$h = \left( D - \sqrt{D^2 - \frac{4A_m}{\pi}} \right) / 2, \quad (2.12)$$

Коефіцієнт заповнення  $K_f$  визначається, як відношення площі  $A_m$ , що займає сипучий матеріал, до робочої площі  $F_p$  поперечного перерізу кожуха:

$$A_m = K_f F_p. \quad (2.13)$$

Таким чином, товщина кільця сипучого матеріалу:

$$h = \left( D - \sqrt{D^2 - K_f \left( D^2 - \frac{\delta^2}{\sin \alpha} \right)} \right) / 2. \quad (2.14)$$

Отже, висота шару сипучого матеріалу залежить від таких параметрів як: діаметр кожуха вала, дроту спіралі, кута підйому гвинтової лінії спірального гвинта та коефіцієнта заповнення кожуха сипучим матеріалом.

Далі, виходячи з вищенаведених формул, подача спірально-гвинтового дозатору становитиме:

$$Q = \frac{SnK_f K_v \rho (\delta + h)}{8h} \left( D^2 - \frac{\delta^2}{\sin \alpha} \right), \quad (2.15)$$

де  $K_f = K_v = 0,75 \dots 1$  при  $\Delta = 0,5 \dots 1$  мм;  $K_f = K_v = 0,65 \dots 1$  при  $\Delta = 1 \dots 2$  мм, коефіцієнти обернено пропорційні частоті обертання робочого органу.

Використання формули (2.15), для визначення подачі спірально-гвинтового

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

дозатору дозволяє отримати більш точні результати.

## **Висновки до розділу 2**

1. Запропонована конструктивно-технологічна схема дозатора органічних добрив.

2. Отримано рівняння подачі спірально-гвинтового дозатору з врахуванням фізико-механічних властивостей добрив і конструктивно-режимних параметрів дозатору.

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

## РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Методика визначення подачі та похибки дозування спірального гвинтового дозатору

Продуктивність дозатору визначимо за формулою:

$$Q = \frac{m}{t}, \text{ г/с} \quad (3.1)$$

де  $m$  – маса виданої порції сипучого матеріалу, г,

$t$  – тривалість подачі матеріалу, с.

Опис конструкції дозатору приведений у розділі 2. У ньому передбачена зміна продуктивності за рахунок наступних параметрів:

- частоти обертання робочого органу 100...1000 хв<sup>-1</sup>;
- внутрішній діаметр кожуху 28...36 мм;
- діаметр робочого органу 15..35 мм.

Методика проведення дослідів полягає у наступному. Дозатор виводили на стійкий режим роботи, після чого знімали проби сипучого матеріалу через кожні 60 секунд. Для оцінки похибки дозування використовували формулу [13-15]:

$$\eta = \frac{100}{m_{cp}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - m_{cp})^2}{n - 1}}, \% \quad (3.2)$$

де  $m_{cp}$  – середня маса матеріалу в пробі, г;

$m_i$  – маса матеріалу в  $i$ -ій пробі, г;

$n$  – загальне число проб.

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Далі визначимо інші параметри, що характеризують роботу спіральних гвинтових робочих органів. Коефіцієнт осевого відставання сипучого матеріалу, що переміщується, визначали за формулою:

$$K_v = \frac{v_{zm}}{v_{zn}}, \quad (3.3)$$

де  $v_{zm}$  – осьова швидкість переміщення матеріалу, м/с;

$v_{zn}$  – осьова швидкість гвинтової поверхні, м/с.

Осьову швидкість матеріалу, що переміщується, розраховували за формулою:

$$v_{zm} = \frac{L}{t}, \text{ м/с} \quad (3.4)$$

де  $L$  – довжина переміщення матеріалу, м;

$t$  – тривалість переміщення, с.

Осьову швидкість гвинтової поверхні розраховували за формулою:

$$v_{zn} = Sn / 60, \text{ м/с}, \quad (3.5)$$

де  $L$  – крок спіралі, м;

$n$  – частота обертання спіралі,  $\text{хв}^{-1}$ .

Визначимо коефіцієнт заповнення кожуху сипучим матеріалом, що переміщується, який розраховується за формулою:

$$K_f = \frac{G_m}{G_T}, \quad (3.6)$$

де  $G_m$  – фактична кількість матеріалу в кожусі, кг;

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

$G_T$  – теоретично можлива кількість матеріалу в кожусі, кг.

Теоретично можлива кількість матеріалу в кожусі розраховується за формулою:

$$G_T = \frac{\pi}{4} (D_k^2 - 3\delta^2) L \rho, \text{ кг}, \quad (3.7)$$

де  $D_k$  – внутрішній діаметр кожуха, м;

$\delta$  – діаметр дроту спіралі, м;

$\rho$  – густина матеріалу, кг/м<sup>3</sup>.

Потужність, яку витрачає електровібратор, визначаємо за формулою:

$$N_{\text{віб}} = m \omega^3 R^2, \text{ кВт}, \quad (3.8)$$

де  $m$  – маса віброуючої установки, кг;

$\omega$  – кутова частота обертання електродвигуна, с<sup>-1</sup>;

$R$  – амплітуда вібрації, м.

### 3.2 Методика обробки даних

Для визначення експериментальних залежностей дозування від конструктивно-режимних параметрів використовували багатофакторне планування експериментів [16-20].

За результатами наявних даних було відзначено 15 факторів, що мають вплив на проведення дослідів. Їх було розділено на групи:

-  $n, d_n, D_k, S, \delta$  – частота обертання робочого органу; зовнішній діаметр робочого органу; внутрішній діаметр кожуха; крок спіралі; діаметр дроту;

-  $L, \Delta, \alpha, \rho, N_{\text{пот}}, W, R, v$  – довжина кожуху; зазор між робочим органом і кожухом; кут нахилу кожуху; щільність матеріалу; споживана потужність; вологість матеріалу; амплітуда вібрації; частота вібрації.

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Були встановлені контрольовані та керовані фактори, що впливають на продуктивність спірально-гвинтового робочого органу, а саме, частота його обертання, зовнішній діаметр, внутрішній діаметр кожуха.

Для аналітичного опису результатів дослідів була обрана модель регресії другого порядку:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^{m_n} b_i x_i + \sum_{i=j}^{m_n} b_{ij} x_i x_j, \quad (3.9)$$

де  $b_0$  – вільний член, рівний відгуку при  $x_i = 0$ ;

$b_i$  – оцінка коефіцієнта регресії;

$b_{ij}$  – оцінка коефіцієнта рівняння регресії подвійної взаємодії;

$x_i, x_j$  – кодоване значення факторів;

$m_n$  – число факторів.

Так як фактори неоднорідні та мають різні одиниці вимірювання, приведемо їх до єдиної системи підрахунку перейшовши від дійсних значень факторів до кодованих, використавши формулу

$$X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\xi_i}, \quad (3.10)$$

де  $x_i$  – натуральне значення і-го фактору;

$x_{i0}$  – натуральне значення і-го фактору на нульовому рівні;

$\xi_i$  – натуральне значення інтервалу варіювання і-го фактору;

$$\xi_i = \frac{x_{iв} - x_{iн}}{2}, \quad (3.11)$$

де  $x_{iв}$  – натуральне значення і-го фактору на верхньому рівні;

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

$x_{in}$  – натуральне значення  $i$ -го фактору на нижньому рівні.

Далі вводимо позначення верхнього, нижнього та основного рівнів факторів +1, -1, 0 відповідно.

Загальне число точок у плані матриці планування, виходячи з двох рівнів планування, знайдемо за виразом

$$N_n = 2^k, \quad (3.12)$$

де  $N$  – загальне число точок у плані;

$k$  – загальна кількість факторів.

Для здійснення експерименту використано плани Плакетта-Бермана. Використання цих планів при числі рівнів варіювання факторів два, допускає проводити незначну кількість дослідів та легко оброблюється. Використання даних планів можливо для числа факторів  $4k - 1$  ( $k = 2, 3, 4, \dots, 25$ , окрім 23). У нашому випадкові маються три фактори для досліджень. Додамо до них фіктивний фактор. Отримаємо план-матрицю для 4-ох факторів (таблиця 3.1).

Наявність фіктивного фактору дозволяє оцінити дисперсію помилок спостереження, але ефект від фіктивних факторів нульовий, якщо відсутня взаємодія між факторами та вимірюваннями.

В таблиці 3.2 представлено кодування факторів експерименту.

Середні значення параметрів оптимізації визначали при обробці паралельних спостережень за формулою:

$$\bar{Y}_v = \frac{\sum_{i=j}^{m_n} Y_{vj}}{m_n}, \quad (3.13)$$

де  $Y_{vj}$  – дійсне значення параметру оптимізації;

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

$v_n$  – рядок плану матриці планування;

$m_n$  – кількість паралельних спостережень;

$j$  – порядковий номер паралельного дослідження у кожній точці плану матриці.

Таблиця 3.1 – Матриця відсіювального експерименту за планом Плакетта-Бермана

№	Фактори			
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	+	-	-	+
2	+	-	-	-
3	+	+	+	-
4	-	+	+	+
5	+	+	+	+
6	-	-	-	+
7	-	+	+	-
8	-	-	-	-

Таблиця 3.2 – Кодування факторів експерименту

Позначення	Найменування фактору	Значення		Одиниці виміру
		-1	+1	
$x_0$	Фіктивний фактор			
$x_1$	Частота обертання	100	1000	хв. <sup>-1</sup>
$x_2$	Діаметр робочого органу	15	35	м
$x_3$	Внутрішній діаметр кожуха	28	36	м

Щоб оцінити відхилення значення параметра оптимізації від середнього значення визначали дисперсію відтворюваності:

$$S_v^2 = \frac{\sum_{v=1}^{m_n} (Y_{vj} - \bar{Y}_v)^2}{m_n - 1}, \quad (3.14)$$

де  $S_v^2$  – дисперсія у кожному рядковій плану матриці.

За G-критерієм Кохрена виконували перевірку однорідності дисперсії та відтворюваності результатів експерименту:

$$G_{\text{розн}} = \frac{S_{v \max}^2}{\sum_{v_n=1}^{N_n} S_v^2}, \quad (3.15)$$

де  $S_{v \max}^2$  – найбільша порядкова дисперсія;

$\sum_{v_n=1}^{N_n} S_v^2$  – сума порядкових дисперсій.

При розрахунковому значенні критерію  $G_{\text{розн}} \leq G_{\text{кр}}$ , гіпотеза про однорідність дисперсії та відтворюваність результатів приймається.

Після прийняття гіпотези про однорідність дисперсії проводили їх усереднення за формулою:

$$S^2 = \bar{S}^2(Y) = \frac{\sum_{v_n=1}^{N_n} S_v^2}{N_n}, \quad (3.16)$$

де  $\bar{S}^2(Y)$  – середнє арифметичне усіх рядків плану;

$N_n$  – кількість дослідів.

Коефіцієнти рівняння регресії представленої моделі процесу визначали за формулою:

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

$$b_i = \frac{\sum_{v_n=1}^{N_n} x_{iv} Y_v}{N_n}, \quad (3.17)$$

де  $b_i$  – коефіцієнт регресії;

$Y_v$  – середнє арифметичне значення критерію оптимізації у кожному рядкові плану матриці.

У визначенні коефіцієнтів рівняння регресії наявні дисперсії, що характеризують помилки, визначали за формулою:

$$S_{(b)}^2 = \frac{\bar{S}^2}{N_n m_n}, \quad (3.18)$$

Середнє квадратичне відхилення дисперсії помилки розподілу коефіцієнтів регресії  $b_i$ , визначали за формулою

$$S_{(b)} = \sqrt{\frac{\bar{S}^2(Y)}{N_n m_n}}, \quad (3.19)$$

Вагомість коефіцієнтів регресії перевіряли за t-критерієм Стьюдента:

$$t_i = \frac{|b_i|}{S_{(b_i)}}, \quad (3.20)$$

де  $|b_i|$  – розрахункові коефіцієнти регресії.

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Критичне значення  $t_{кр}$  визначали із числа ступенів вільності  $V_{зн} = N_n (m - 1)$  і на прийнятому рівні вагомості  $q = 5\%$ . Коефіцієнти  $b_i$  є вагомими, якщо розрахункове значення  $t_i \geq t_{кр}$ .

Оцінку дисперсії адекватності моделі визначали за формулою:

$$S_{ab}^2 = \frac{m_n}{N_n - \ell} \sum (\bar{Y}_v - Y_v)^2, \quad (3.21)$$

де  $Y_v$  – маточікування параметра оптимізації;

$\ell$  – число вагомих коефіцієнтів.

Потім адекватність отриманої моделі перевіряли за F-критерієм Фішера:

$$F_{розр} = \frac{S_{ab}^2}{S^2(Y)} < F_{таб}. \quad (3.22)$$

Табличне значення  $F_{таб}$  приймали виходячи з певних чисел ступенів вільності  $V_{1ab} = (N_n - 1)$  та  $V_{2ab} = N_n (m_n - 1)$  при рівні вагомості  $q = 5\%$ .

При  $F_{розр} < F_{кр}$  гіпотеза адекватності моделі приймається.

Розрахунок та обробку результатів даних, побудову поверхонь відгуків та графіків здійснювали програмними засобами.

### 3.3 Методика визначення фізико-механічних властивостей сипучих матеріалів

Насипною щільністю матеріалу, називається маса речовини в одиниці об'єму, що займає матеріал. Насипну щільність визначимо за допомогою пристрою (рисунок 3.1) [21-23].

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Рисунок 3.1 – Пристрій для визначення насипної  
щільності сипучого матеріалу

Мірна судина 1 зі штирем 2, навколо якого обертається рамка 3. Висота посуду рівна двом його внутрішнім діаметрам, а висота рамки – 1/3 висоті судини. При визначенні насипної щільності діаметр судини повинен перевищувати не менш як в 10 раз розмір типових шматків матеріалу.

Поворотну рамку встановлюють так, щоб її стінки були продовженням стінок судини. Потім засипають у судину матеріал до верха рамки, далі повертають рамку навколо штиря, яка зрізує надлишок насипного матеріалу. Матеріал, що залишився в судині, зважують і визначають насипну щільність, середнє значення даних заносимо до формули:

$$\rho_m = \frac{m}{V_1}, \text{ кг/м}^3, \quad (3.23)$$

де  $m$  – маса матеріалу в судині, кг;

$V_1$  – об'єм судини, м<sup>3</sup>.

Вологість сипучого матеріалу визначимо просушуючи при температурі 105<sup>0</sup>С, періодично потрібно зважувати пробу матеріалу. Просушуємо до тих пір, доки не встановиться постійна маса.

Вологість  $w$  визначимо за формулою:

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2}, \%, \quad (3.24)$$

де  $m_1, m_2$  – маса порцій до просушування та після просушування, г.

Початковий опір зрушення  $\tau_0$  знайдемо за допомогою пристрою, що визначає максимальну висоту стінки, що вільно стоїть (рисунок 3.2). Такий пристрій складається із судини 1 з відкидною стінкою 2. Спочатку встановлюємо стінку в вертикальне положення. Сосуд наповнюємо сипучим матеріалом так, щоб поверхня вантажу була горизонтальною. Після чого відкидну стінку відхиляємо в напрямі стрілки. Якщо матеріал не обсипається і зберігає вертикальний укіс, то дослід повторюють при збільшенні висоти до тих пір, поки не буде знайдена максимальна висота  $h_0$ , при перевищенні якої матеріал руйнується, середнє значення даних заносимо до формули:

$$\tau_0 = \frac{\rho_m h_0}{4}, \text{ Па}, \quad (3.25)$$

де  $h_0$  – висота стінки, м.

Рисунок 3.2 – Пристрій для визначення максимальної висоти стінки, що вільно стоїть

Сипкість матеріалу характеризується залежностями граничних дотичних напружень від тиску в товщі сипучого матеріалу. Графік граничних дотичних напружень (рисунок 3.3) будують за результатами випробувань.

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

### Рисунок 3.3 – Графік граничних дотичних напружень

Жолоб 1 і раму 2 (рисунок 3.4) заповнюють насипним матеріалом, порцію матеріалу, що розміщена в рамці 2, притискують до матеріалу в жолобі 1 притискними пластинами 3. Рамка має котки 5, які опираються на направляючі 6. Рамка 2 з'єднана з вантажною чашкою 4 шнуром. На вантажну чашку встановлюють гирі, під їх вагою рамка рухається, і виникає зріз матеріалу.

### Рисунок 3.4 – Трибометр

Напруження  $\sigma$  і  $\tau$ , для побудови графіку, визначають за формулою:

$$\sigma = \frac{G}{F}, \text{ Н/м}^2, \quad (3.26)$$

$$\tau = \frac{T - T_p}{F}, \text{ Н/м}^2, \quad (3.27)$$

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

де  $G$  – загальна вага притискних пластин і матеріалу в рамці, Н;

$T$  – сила зсуву, Н;

$F$  – площа зрізу, м<sup>2</sup>;

$T_p$  – опір рухомої рамки, Н.

Кут  $\varphi$  називається кутом внутрішнього тертя, а тангенс цього кута – коефіцієнт внутрішнього тертя  $f$ , який визначається за формулою:

$$\operatorname{tg}\varphi = f. \quad (3.28)$$

Коефіцієнт внутрішнього зсуву визначимо за формулою:

$$f_{\sigma} = \operatorname{tg}\varphi_{\sigma}. \quad (3.29)$$

Кут природного відкосу  $\alpha_0$ , що може бути визначений методом, що описаний нижче (рисунок 3.5). Циліндр 1 встановлено на площину 2 і заповнено насипним матеріалом доверху. Потім циліндр повільно піднімають, при цьому матеріал витікає і розташовується під кутом природного укосу  $\alpha_0$ .

Рисунок 3.5 – Визначення кута природного укосу

Сипкість кількісно оцінюють коефіцієнтом сипкості (рухливість)  $m$ , що характеризує здатність частин матеріалу до відносної рухомості, визначається за формулою:

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

$$m_i = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}. \quad (3.30)$$

Найбільший розмір утворення склепіння сипучого матеріалу визначають наступним чином, використовуючи для цього прилад (рисунок 3.6).

Прилад складається з циліндричного бункера 1, на дні якого розміщується отвір. На отвір встановлюють діафрагми 2 з отворами різних діаметрів  $d$ . Закриття бункера виконується за допомогою заслінки 3.

Далі на дні бункера 1 розміщували діафрагму 2 з найбільшим отвором, дно якого закривалося заслінкою 3, і в бункер засипали сипучий матеріал, потім відкривали заслінку. Якщо витікання матеріалу відбувалося вільно, без утворення склепіння, тоді діафрагму замінювали на іншу, але з меншим отвором. Дослід проводили до утворення склепіння в матеріалі. Найменший діаметр отвору, при якому відбувалося склепіння, є діаметром отвору, що призводить до його утворення.

Рисунок 3.6 – Прилад для визначення діаметра отвору,  
при якому утворюється склепіння

Вимірювання проводили з триразовою повторюваністю, після чого рахували середнє значення.

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

### Висновки до розділу 3

1. Представлена методика визначення подачі та похибки дозування спірального гвинтового дозатору.
2. Наведена методика обробки даних.
3. Запропоновано методику визначення фізико-механічних властивостей сипучих матеріалів.

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

## РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

### 4.1 Дослідження дозування сипучих матеріалів

Дослідження проводилися з використанням пластикового кожуху, конусного бункеру та електровібратора.

У пункті 2 показана схема пристрою, а на рисунку 4.1 зображено загальний вигляд дозатору при дослідженні.

Рисунок 4.1 – Загальний вид дозатору: 1 – частотний перетворювач; 2 – електродвигун; 3 – конусний бункер; 4 – кожух зі спірально-гвинтовим робочим органом; 5 – електровібратор; 6 – ватметр; 7 – амперметр

Результати досліджень для визначення подачі дозатору зі спірально-гвинтовим робочим органом діаметрами  $d_n=0,015\dots0,035$  м, кроком гвинтової лінії  $S=0,02$  м, діаметром дроту  $\delta=0,003$  м, довжиною кожуха  $L=0,27$  м і внутрішніми діаметрами кожуха  $D_k=0,028\dots0,036$  м, частота обертання спіралі становила  $n=100\dots1000$  хв<sup>-1</sup>, зазор між  $D_k$  і  $d_n$ ,  $\Delta=(D_k - d_n)/2=0,0065$  м. В усіх дослідженнях по визначенні подачі і похибки дозатору використаний матеріал – добриво «Нітрофоска» з насипною щільністю  $\rho=360$  кг/м<sup>3</sup>.

Розрахуємо результати для випадку  $d_H=15$  мм,  $D_k=28$  мм,  $n=100$ хв<sup>-1</sup>.

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Визначимо масу матеріалу при повному заповненні кожуха:

$$G_T = \rho V_T = \rho(V_k - V_{np}) = \rho(0,25\pi D_k^2 L - 0,25\pi \delta^3 3L) \\ = 360(0,25 \cdot 3,14 \cdot 0,028^2 \cdot 0,27 - 0,25 \cdot 3,14 \cdot 0,003^2 \cdot 3 \cdot 0,27) = 0,00578 \text{ кг} = 57,8 \text{ г} \quad (4.1)$$

Коефіцієнт заповнення:

$$K_f = \frac{G_m}{G_T} = 38,33 / 57,8 = 0,66 \quad (4.2)$$

де  $G_m$  – маса матеріалу в кожусі (експериментальна), г.

Осьова швидкість гвинтової поверхні:

$$v_{zn} = \frac{s_n}{60} = 0,02 \cdot 100 / 60 = 0,033 \text{ м / с} \quad (4.3)$$

Осьова швидкість матеріалу при цьому:

$$v_{zm} = \frac{L}{t} = 0,27 / 25,3 = 0,011 \text{ м / с} \quad (4.4)$$

де  $t$  – тривалість проходження матеріалу, с.

Коефіцієнт осьового відставання:

$$K_v = \frac{v_{zm}}{v_{zn}} = 0,011 / 0,033 = 0,33 \quad (4.5)$$

Продуктивність дозатору визначимо за формулою:

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

$$Q = \frac{m}{t_n} = 17,33 / 60 = 0,29 \text{ г / с} = 1,04 \text{ кг / год} = 2,8 \text{ дм}^3 / \text{год}, \quad (4.6)$$

де  $m$  – маса виданої порції за проміжок часу, г,

$t_n$  – тривалість видачі порції матеріалу, с.

Для оцінки похибки дозування використали формулу:

$$\eta = \frac{100}{m_{cp}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - m_{cp})^2}{n-1}} = \frac{100}{17,33} \sqrt{\frac{(17-17,33)^2 + (18-17,33)^2 + (17-17,33)^2}{3-1}} = 3,33\%. \quad (4.7)$$

де  $m_{cp}$  – середня маса матеріалу в пробі, г;

$m_i$  – маса матеріалу в  $i$ -ій пробі, г,

$n$  – загальна кількість проб.

Опис експериментальних даних подачі при дозуванні сипучого матеріалу спіральньо-гвинтовим робочим органом з різними діаметрами гвинта і кожуха наведені на рисунку 4.2.

Рисунок 4.2 – Залежність подачі  $Q$  при різних діаметрах робочого органу  $d_H$  і кожуха  $D_K$  від частоти обертання  $n$

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Далі для аналізу ефективності роботи спіраль-гвинтового дозатору при  $D_k=28$  мм були отримані дані і побудоване рівняння регресії в натуральних значеннях (4.8), що описує характер змін залежності подачі  $Q$ , кг/год., сипучого матеріалу від частоти обертання спіралі  $n$ ,  $\text{хв}^{-1}$ , і зазору між спіраллю і кожухом  $\Delta$ , мм, подане на рисунку 4.3.

$$Q = 15,486 + 2,121 \cdot 10^{-2} n - 3,89 \Delta - 4,83 \cdot 10^{-6} n^2 - 1,409 \cdot 10^{-3} n \Delta + 0,216 \Delta^2. \quad (4.8)$$

Рівняння (4.9) у кодованих значеннях факторів набуває наступного вигляду:

$$Q = 10,483 + 4,651x_1 + 7,331x_2 - 0,975x_1^2 + 1,6x_1x_2 + 1,353x_2^2, \quad (4.9)$$

де  $x_1$  – частота обертання спіралі,  $x_2$  – зазор між спіраллю та кожухом.

Аналіз рівняння (4.9) вказує на те, що серед лінійних значень факторів найбільший вплив на критерії оптимізації має зазор між спіраллю і кожухом, причому зі збільшенням значення цього фактору значення критерію оптимізації збільшується. Найменше значення серед лінійних має поєднання факторів частоти обертання спіралі і зазору між спіраллю і кожухом, причому при збільшенні значення кожного фактору, значення критерію оптимізації збільшується. Серед нелінійних факторів найбільший вплив має квадрат зазору між спіраллю і кожухом, причому при зростанні цього значення, зростає значення критерію оптимізації. Найменше значення серед нелінійних факторів має квадрат частоти обертання спіралі, причому зі збільшенням значення цього фактору, значення критерію оптимізації зменшується.

Із залежності, яку отримали із рівняння регресії (4.8), встановлено, що максимальне значення подачі  $Q=26,78$  кг/год. при частоті обертання  $n=1000$   $\text{хв}^{-1}$  і зазорі  $\Delta=1$  мм.

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Рисунок 4.3 – Залежність подачі  $Q$  дозатору від частоти обертання  $n$  і від зазору  $\Delta$  між спіраллю і кожухом при  $D_k=28$  мм

При  $D_k=36$  мм були отримані дані і побудовано рівняння регресії в натуральних значеннях (4.10), що описує залежність подачі  $Q$ , кг/год., сипучого матеріалу від частоти обертання спіралі  $n$ ,  $\text{хв}^{-1}$ , і зазору між спіраллю і кожухом  $\Delta$ , мм, подане на рисунку 4.4.

$$Q = 15,16 + 7,889 \cdot 10^{-2}n + 0,512\Delta - 3,862 \cdot 10^{-5}n^2 - 1,942 \cdot 10^{-3}n\Delta - 0,378\Delta^2. \quad (4.10)$$

Рівняння (4.10) у кодіваних значеннях факторів набуває наступного вигляду:

$$Q = 32,338 + 12,4x_1 + 14,118x_2 - 7,829x_1^2 + 3,224x_1x_2 - 0,013x_2^2. \quad (4.11)$$

Аналіз рівняння (4.11) вказує на те, що серед лінійних значень факторів найбільший вплив на критерії оптимізації має зазор між спіраллю і кожухом, причому зі збільшенням значення цього фактору значення критерію оптимізації збільшується. Найменше значення серед лінійних має поєднання факторів частоти обертання спіралі і зазору між спіраллю і кожухом, причому при збільшенні

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

значення кожного фактору, значення критерію оптимізації збільшується. Серед нелінійних факторів найбільший вплив має частота оберту спіралі, причому при зростанні цього значення, зменшується значення критерію оптимізації. Найменше значення серед нелінійних факторів має квадрат зазору між спіраллю і кожухом, причому зі збільшенням значення цього фактору, значення критерію оптимізації зменшується.

Рисунок 4.4 – Залежність подачі  $Q$  дозатору від частоти обертання  $n$  і від зазору  $\Delta$  між спіраллю і кожухом при  $D_k=36$  мм

Із залежності, яку отримали із рівняння регресії (4.10), встановлено, що максимальне значення подачі  $Q=54,62$  кг/год. при частоті обертання  $n=1000$  хв<sup>-1</sup> і зазорі  $\Delta=0,5$  мм.

При аналізі подачі дозатору при різних діаметрах спіралі і кожуху виявлено, що найбільш оптимальними параметрами з широким діапазоном регулювання дозування є використання  $d_s=25$  мм при  $D_k=28$  мм,  $d_s=35$  мм при  $D_k=36$  мм.

На рисунку 4.5 представлена залежність подачі матеріалу від частоти обертання спірального гвинта в порівнянні з теоретичними дослідженнями.

При  $d_n=25$  мм,  $D_k=28$  мм побудовано рівняння регресії (4.12) подачі  $Q$ , кг/год, сипучого матеріалу від частоти обертання спіралі  $n$ , хв<sup>-1</sup>:

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

$$Q = 9,774 + 2,549 \cdot 10^{-2}n - 1,115 \cdot 10^{-5}n^2. \quad (4.12)$$

При  $d_n=35$  мм,  $D_k=36$  мм побудовано рівняння регресії (4.13):

$$Q = 20,15 + 6,717 \cdot 10^{-2}n - 3,136 \cdot 10^{-5}n^2. \quad (4.13)$$

Рисунок 4.5 – Залежність подачі сипучого матеріалу від частоти обертання спірального гвинта в порівнянні з теоретичними даними

Задана норма дозування регулювалася за рахунок зміни частоти обертання робочого органу, за допомогою частотного перетворювача струму, змінюючи частоту обертання приводу.

На рисунку 4.6 представлений графік залежності частоти обертання робочого органу  $n$  і подачі  $Q$  від частоти струму  $v$ .

Виходячи із графіку, зображеного на рисунку 4.6 можливо визначити норму подачі дозатору при зміні частоти струму, більш точну норму подачі дозування, визначимо за формулами 4.14...4.17.

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Рисунок 4.6 – Графік залежності частоти обертання робочого органу  $n$  і подачі  $Q$  від частоти струму  $v$

При  $d_2=25$  мм,  $D_k=28$  мм:

$$Q = 7,014 + 0,828 \cdot v - 0,01v^2 \quad (4.14)$$

$$v = 4,778 - 0,904Q + 0,087Q^2 \quad (4.15)$$

При  $d_2=35$  мм,  $D_k=36$  мм:

$$Q = 12,938 + 2,194 \cdot v - 0,28v^2 \quad (4.16)$$

$$v = 12,416 - 0,771Q + 0,021Q^2 \quad (4.17)$$

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Так при роботі дозатору використовують електровібратор для обвалу арок сипучого матеріалу, для цього розраховуємо енерговитрати всього процесу дозування (рисунок 4.7), враховуючи споживаючу потужність електровібратору  $N_{\text{вібр.}}=51 \text{ Вт}$ .

Рисунок 4.7 – Залежність питомих енергозатрат дозування від частоти обертання спірального гвинта

У ході дослідження дозування, отримані теоретичні залежності подачі  $Q$  сипучого матеріалу від частоти обертання  $n$  спірального гвинта. Виявлені похибки дозування при різних параметрах, таких як зовнішній діаметр спірального гвинта  $d_n$  і внутрішній діаметр кожуху  $D_k$ .

#### 4.2 Фізико-механічні властивості сипучого матеріалу

Модифікатор мінеральних добрив, бактеріальне добриво «Екстрасол» призначений для біологічної модифікації усіх видів мінеральних добрив з метою підвищення їх засвоєння.

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

«Екстрасол» за зовнішнім виглядом являє собою порошок від світло-сірого до кремового кольору. Діючою речовиною є штаб ризосферних бактерій *Basillus subtilus* та їх метаболіти [24].

Дане бактеріологічне добриво належить до насипних матеріалів, що мають певні фізичні властивості. Насипні матеріали характеризуються розміром типового шматка. Даний вид бактеріального добрива належить до пилоподібних матеріалів, де розмір типового шматка менший за 0,05 мм.

Визначимо насипну щільність, середнє значення даних заносимо до формули:

$$\rho_m = \frac{m}{V_1} = \frac{0,36}{0,001} = 360 \text{ кг/м}^3. \quad (4.18)$$

де  $m$  – маса матеріалу в посуді, кг;

$V_1$  – об'єм посудини, м<sup>3</sup>.

За показниками насипної щільності розрізняють сипучі матеріали: легкі (до 600 кг/м<sup>3</sup>), середні (600...1100 кг/м<sup>3</sup>), важкі (1100...2000 кг/м<sup>3</sup>), дуже важкі (більше 2000 кг/м<sup>3</sup>). Даний вид бактеріального добрива належить до легких сипучих матеріалів.

Маса матеріалу до сушки  $m_1=4,652$  г, після сушки  $m_2=4,558$  г, вологість  $w$  визначимо за формулою:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} 100\% = \frac{4,652 - 4,558}{4,652} 100\% = 2\% \quad (4.19)$$

Визначимо за допомогою пристрою (див. розділ 3) початковий опір зрушення:

$$\tau_0 = \frac{\rho_m h_0}{4} = 360 \cdot 0,202 / 4 = 18,2 \text{ кг / м}^2 = 182 \text{ Н / м}^2, \quad (4.20)$$

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

де  $\rho_m$  – насипна щільність матеріалу,  $\text{кг/м}^3$ ;

$h_0$  – висота стінки, м.

Сипучість матеріалу визначається із граничних дотичних напружень від тиску в товщі сипучого матеріалу. Приклад графіку граничних дотичних напружень наведений на рисунку розділу 3 і будують за результатами випробувань.

Напруження  $\sigma$  і  $\tau$ , для побудови графіку, значення визначають із результатів вимірювань за допомогою трибометра (розділ 3), розраховують за формулами:

$$\sigma = \frac{G}{F} = \frac{19,9}{0,017} = 1170 \text{ Н/м}^2, \quad (4.21)$$

$$\tau = \frac{T - T_p}{F} = \frac{6,9 - 0,9}{0,017} = 353 \text{ Н/м}^2, \quad (4.22)$$

де  $G$  – загальна вага притискних пластин і матеріалу в рамці, Н;

$T$  – сила зрушення, Н;

$F$  – площа зрізу,  $\text{м}^2$ ;

$T_p$  – опір рухомої рамки, Н.

Кут внутрішнього тертя  $\varphi$ , а тангенс цього кута – коефіцієнт внутрішнього тертя  $f$ , який визначається:

$$\text{tg } \varphi = \text{tg } 16,5^\circ \approx 0,3. \quad (4.23)$$

Коефіцієнт внутрішнього зсуву визначається:

$$f_\sigma = \text{tg } \varphi_\sigma = \text{tg } 17^\circ \approx 0,31. \quad (4.24)$$

Кут природного укосу  $\alpha_0$ , який може бути визначений методом, що описано в розділі 3, з дослідних даних слідує  $\alpha_0 \approx 45^\circ$ .

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Сипучість кількісно оцінили за допомогою коефіцієнту сипучості (рухомості)  $m$ , який характеризує можливість частинок матеріалу до відносної рухомості, визначається за формулою:

$$m = \frac{(1 - \sin \varphi)}{(1 + \sin \varphi)} = \frac{(1 - \sin 16,5^\circ)}{(1 + \sin 16,5^\circ)} = 0,56. \quad (4.25)$$

Найбільший розмір утворення склепіння сипучого матеріалу визначається за допомогою пристрою (розділ 3),  $d=264$  мм.

#### **Висновки до розділу 4**

1 Продуктивність дозатору становить 2,8 дм<sup>3</sup>/год. Похибка дозування становить 3,33%. Отримані залежності подачі при різних діаметрах робочого органу та кожуху від частоти обертання. Проведено порівняння теоретичних та експериментальних значень.

2 Визначені фізико-механічні властивості сипучого матеріалу, а саме насипна щільність 360 кг/м<sup>3</sup>, вологість 2%, початковий опір зсуву 182 Н/м<sup>2</sup>, кут внутрішнього тертя 16,5°, коефіцієнт внутрішнього тертя 0,3, коефіцієнт внутрішнього зсуву 0,31, кут справжнього укусу 45°, коефіцієнт сипучості (рухомості) 0,56, найбільший розмір склепіння при діаметрі діафрагми 264 мм.

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

## РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

### 5.1 Розрахунок економічного ефекту

Економічна ефективність використання нової техніки, винаходів та раціоналізаторських пропозицій становить

$$E = (\Delta C + \Delta Ц) \cdot A_2 - (0,15 + A_1) \cdot K, \quad (5.1)$$

де  $\Delta C$  – зменшення собівартості 1 т продукції після впровадження заходу, грн.;

$\Delta Ц$  – збільшення вартості продукції, грн.;

$A_1$  – коефіцієнт, що враховує амортизаційні відрахування,  $A_1 = 0,1$ ;

$A_2$  – кількість продукції, т,  $A_2 = 0,5$  т;

0,15 – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

$K$  – капітальні вкладення на впровадження заходів, грн.,  $K = 10000$  грн. (за даними підприємства).

Економія від зниження собівартості утворюється за рахунок зниженням трудомісткості та витрат на виготовлення вузлів кріплення:

$$\Delta C = 0,1 \cdot 170000 = 17000 \text{ грн./т},$$

де 170000 – середня вартість 1 тони продукції, грн.

Ціна продукції збільшиться за рахунок доплат:

$$\Delta Ц = \Delta Ц', \quad (5.2)$$

де  $\Delta Ц'$  – середнє збільшення доплат за рахунок даних заходів, грн./т,

$$\Delta Ц' = 75 \text{ грн./т};$$

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

$$\Delta Ц = 75 \text{ (грн./т)}.$$

Відповідно до формули (5.1) маємо наступне:

$$E = (17000 + 75) \cdot 0,5 - (0,15 + 0,1) \cdot 10000 = 6037,5 \text{ (грн.)}.$$

Отже, економічний ефект від впровадження дозатора склав 6037,5 грн. на рік.

## 5.2 Техніка безпеки під час роботи із добривами

Однією із головних вимог при роботі з мінеральними добривами є можливість допуску до даного типу підкормки тільки фахівців, що пройшли спеціальний інструктаж. Окрім того, допуск до роботи із мінеральними добривами отримують лише особи, що досягли повноліття. Слід відзначити, що відповідно до правил техніки безпеки, робітники, що контактують із мінеральними добривами, повинні використовувати окуляри, респіратори, рукавиці та інші запобіжні заходи, що захищають їх тіло від дотику із добривами. Для роботи із останніми також необхідно надіти спецодяг.

Зберігання мінеральних добрив вимагає дотримання певних правил техніки безпеки. Перш за усе, це стосується пожежонебезпечних мінеральних добрив, як аміачна селітра. Такі добрива заборонено зберігати у безпосередній близькості із нафтопродуктами, торфом та іншими горючими матеріалами. Більш того, для зберігання аміачної селітри необхідно використовувати спеціальний склад, на якому не повинні знаходитись інші мінеральні добрива. Також на складах зберігання мінеральних добрив не повинно бути хімічних консервантів, фарб, кормових добавок, харчових продуктів, предметів домашнього побуту.

У місцях зберігання пожежонебезпечних мінеральних добрив заборонено палити або користуватися відкритим вогнем. Під заборону потрапляють і інші нагрівальні пристрої. У тому випадку, якщо на складі для мінеральних добрив

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

відбулася пожежа, для гасіння полум'я необхідно використовувати виключно воду. При цьому під час тушіння слід обов'язково використовувати протигази, що захистить від негативного впливу окисдів азоту.

Дотримання основ техніки безпеки при роботі з мінеральними добривами необхідно для запобігання негативного впливу даного підживлення для рослин на організм людини. Мінеральні добрива можуть потрапляти до організму як через дихальні шляхи, так і через слизові оболонки очей та шкіру. Отруєння мінеральними добривами може призвести до ураження нирок, печінки, центральної нервової системи та інших внутрішніх органів. Цей факт необхідно враховувати кожному агроному, що працює з мінеральними добривами. У цілому випадки отруєння мінеральними добривами частіше за все зумовлені недбаліми поведінками. Тому любий агроном повинен знати основні правила техніки безпеки роботи із мінеральним підживленням для сільськогосподарських культур.

Для того, щоб попередити можливий негативний вплив мінеральних добрив на організм, необхідно дотримуватися кількох правил. Понад усе, у процесі безперервної роботи із мінеральними добривами у респіраторі необхідно робити незначні 5-хвилинні паузи. Після завершення робочого дня агроном повинен обов'язково прийняти душ та ретельно вимити тіло. Саме тому на місці роботи з мінеральними добривами завжди необхідно мати запас чистої води.

### **5.3 Технології захоронення токсичних відходів**

Технологія захоронення токсичних відходів залежить від класу їх токсичності:

- нерозчинні відходи II-IV класів небезпеки розміщуються у картах полігону шарами з ізоляцією шаром ґрунту;
- відходи I класу небезпеки розміщують у спеціальних металевих контейнерах із товщиною стінок не менше 10 мм та здійснюють контроль на герметичність до та після заповнення контейнеру.

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Бункер для зберігання повинен мати залізобетонне облицювання із товщиною стінок не менше 20 мм та не менше п'яти відсіків для захоронення особливо токсичних відходів та концентрованих розчинів; передбачається їх попереднє затвердіння. Так, наприклад, при відкритому зберіганні ціаністих відходів до атмосфери випаровується близько 90% ціаністого водню, близько 3% залишається у відходах та близько 3% потрапляє до ґрунтових вод. Зберігання на полігонах відходів, що містять хром, ртуть, миш'як призводить до появи в ґрунтових водах підвищених концентрацій елементів.

Під час твердіння отримують нерозчинні з'єднання, що формують у вигляді блоків. При збереженні таких блоків токсичні домішки з них не вимиваються.

Для здійснення процесу затвердіння до відходів додають в'язучі речовини, цемент, вапно, формують у вигляді блоків. Але отримані блоки не стійкі до кислотних компонентів та в кислих ґрунтах поступово руйнуються.

Токсичні відходи, наприклад радіоактивні, оброблюють бітумом, парафіном чи поліетиленом із подальшою термообробкою; отримані продукти відносно стійкі до більшості ґрунтових розчинів.

Рідкі неорганічні та радіоактивні відходи сплавляють зі скло утворюючими з'єднаннями. Це забезпечує високоефективне поєднання токсичного компонента і тривалість зберігання. Але ця технологія потребує високих температур. Із цим пов'язане значне споживання енергії.

Деякі токсичні відходи сплавляють у печах зі склом, потім розплав зливають у циліндри з легованої сталі. Окремі відходи піддають полімеризації із карбамідоформальдегідними смолами. Капсулювання токсичних відходів здійснюють із застосуванням полібутадієнових та поліетиленових ізолюючих шарів.

Метод затвердіння відходів є одним із самих дорогих. Наприклад, у США для видалення 1 м<sup>3</sup> стічних вод за рахунок стабілізації витрачають близько 8 доларів.

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Наведені технології захоронення токсичних відходів не вирішують екологічні проблеми протягом тривалого геологічного часу, забруднюють надра, підземні води та у підсумку забруднюють поверхню землі. Футеровки контейнерів із відходами в глибинах піддаються тривалому впливу підземних високо мінералізованих вод та високоактивних газів – у підсумку виводять відходи на поверхню.

### **Висновки до розділу 5**

Розглянуто економічну ефективність від упровадження результатів досліджень. Визначено особливості безпечної роботи із добривами. Приділено увагу питанням захисту довкілля.

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

## ВИСНОВКИ

Отже, відповідно до отриманого завдання на кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти та за результатами її виконання зроблено наступні висновки.

1. Запропонована конструктивно-технологічна схема дозатора органічних добрив.

2. Отримано рівняння подачі спірального-гвинтового дозатору з врахуванням фізико-механічних властивостей добрив і конструктивно-режимних параметрів дозатору.

3. Представлена методика визначення подачі та похибки дозування спірального-гвинтового дозатору та обробки отриманих даних.

4. Запропонована методика визначення фізико-механічних властивостей сипучих матеріалів.

5. Визначена продуктивність дозатору, похибка дозування, а також отримані залежності подачі при різних діаметрах робочого органу та кожуху від частоти обертання.

6. Визначено фізико-механічні властивості сипучого матеріалу, а саме насипна щільність, вологість, початковий опір зсуву, кут внутрішнього тертя, коефіцієнт внутрішнього тертя, коефіцієнт внутрішнього зсуву, кут справжнього укосу, коефіцієнт сипучості (рухомості).

7. Приділено увагу питанням економічної ефективності, охорони праці та захисту довкілля.

					КРМ.133ГМмд_21.24.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53