

**ДНПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-технологічний факультет**

Кафедра тракторів і сільськогосподарських машин

**П о я с н ю в а л ь н а   з а п и с к а**

до дипломної роботи

освітнього ступеня «Магістр» на тему

**Обґрунтування параметрів та конструкції  
культиватора-підживлювача**

**Виконав:** студент 2 курсу, групи МгАІ-4-24

за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

\_\_\_\_\_ Карайда Анатолій Миколайович

**Керівник:** \_\_\_\_\_ Бойко Владислав Борисович

**Рецензент:** \_\_\_\_\_

Дніпро 2025

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра тракторів і сільськогосподарських машин

Освітній ступінь: «Магістр»

Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

В.о. завідувача кафедри  
тракторів і сільськогосподарських машин

(назва кафедри)

ДОЦЕНТ

(вчене звання)

Теслюк Г.В.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Карайді Анатолію Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

**1. Тема роботи:** Обґрунтування параметрів та конструкції культиватора-підживлювача

керівник роботи Бойко Владислав Борисович к.т.н., доцент

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від

«24» жовтня 2025 року № 3182

**2. Строк подання студентом роботи** 9.12.2025 р.

**3. Вихідні дані до роботи** Наукові звіти кафедри ТСГМ. Технічні характеристики енергетичних засобів для агрегування культиватора. Агровимоги до процесу підгрунтового підживлення культур.

**4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки** (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Стан питання і завдання досліджень. 2. Теоретичні дослідження. 3. Експериментальні дослідження. 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 5. Економічна ефективність роботи. Висновки. Список використаних джерел

## 5. Перелік демонстраційного матеріалу

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

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-5	Бойко В. Б., доцент		
нормоконтроль	Золотовська О.В., доцент		

7. Дата видачі завдання: 2.09.2025 р

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний (оглядовий)	до 15.09.2025 р.	Виконано
2	Теоретичний	до 18.10.2025 р.	Виконано
3	Експериментальний	до 14.11.2025 р.	Виконано
4	Охорона праці	до 18.11.2025р.	Виконано
5	Економічний	до 23.11.2025 р.	Виконано
6	Демонстраційна частина	до 7.12.2025 р.	Виконано

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Карайда А.М.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Бойко В.Б.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)



## РЕФЕРАТ

Карайда А.М. Обґрунтування параметрів та конструкції культиватора-підживлювача/ Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2025.

У роботі розглянуто питання удосконалення конструкції культиватора-підживлювача, призначеного для міжрядного обробітку та локального внесення добрив у системах точного землеробства. Основну увагу приділено розробленню універсальної конструкції робочих секцій, які можуть агрегуватися як з традиційними колісними тракторами, так і з мостовими енергетичними засобами. Запропонована модульна будова забезпечує швидку адаптацію агрегату до різних типів тяглових машин і технологічних схем обробітку. У роботі проведено обґрунтування основних параметрів робочих органів, глибини культивації та системи дозованого підживлення. Виконано аналіз впливу геометричних і кінематичних характеристик на рівномірність внесення добрив та якість обробітку ґрунту. Результати дослідження свідчать, що впровадження універсального культиватора-підживлювача сприяє підвищенню енергоефективності технологічних процесів, зменшенню ущільнення ґрунту й оптимізації використання мінеральних добрив. Розроблена конструкція може бути інтегрована до сучасних мехатронних комплексів мостових машин і систем моніторингу параметрів роботи в режимі реального часу.

**Ключові слова:** культиватор-підживлювач, універсальна секція, мостова машина, точне землеробство, локальне внесення добрив, енергоефективність, мехатронна система, міжрядний обробіток ґрунту.

## ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	11
1.1. Технологічні особливості процесу міжрядного обробітку та локального внесення добрив	11
1.2 Сучасний стан та напрями розвитку машин для міжрядного обробітку ґрунту і підживлення культур	16
1.3 Аналіз конструкцій дозаторів туків	24
1.4 Особливості використання культиваторів-підживлювачів в мостового технології точного землеробства	28
1.5 Висновки	32
1.6 Мета і завдання досліджень	32
2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	34
2.1 Конструктивне рішення культиватора-підживлювача	34
2.2 Мехатронна інтеграція та автоматизоване керування	37
2.3 Теоретичне дослідження параметрів дозуючого пристрою	38
2.4 Теоретичні дослідження параметрів культиваторної лапи-сошника для розподілу туків по ширині рядка	41
2.5 Висновки	48
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	49
3.1 Програма та мета експериментальних досліджень	49
3.2 Експериментальний зразок культиватора-підживлювача	50
3.3 Експериментальні дослідження лапи-сошника з розсіювачем	53
3.4 Експериментальні дослідження локального внесення добрив в польових умовах	57
3.5 Висновки	60

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	61
4.1 Аналіз умов праці та виробничих небезпек під час роботи культиватора-підживлювача у складі трактора	61
4.2 Дії персоналу в аварійних та надзвичайних ситуаціях	64
4.3 Висновки	68
5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ КУЛЬТИВАТОРА-ПІДЖИВЛЮВАЧА	69
5.1 Мета та завдання розрахунку	69
5.2 Вихідні дані для техніко-економічного розрахунку	69
5.3 Методика розрахунку техніко-економічних показників	71
5.4 Результати порівняння базового та проектного культиваторів-підживлювачів	72
5.5 Висновки	73
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	76
ДОДАТКИ	80

## ВСТУП

### *Актуальність теми.*

Сучасне сільськогосподарське виробництво в Україні потребує технічних рішень, які забезпечують одночасно підвищення ефективності обробітку ґрунту, економію ресурсів і збереження екологічної рівноваги. Зменшення родючості орних земель, зростання вартості мінеральних добрив і пального, а також глобальні кліматичні зміни вимагають впровадження енергозберігаючих технологій та універсальних технічних засобів для точного землеробства [1].

Одним із перспективних напрямів розвитку агроінженерії є створення універсальних культиваторів-підживлювачів, здатних поєднувати операції міжрядного обробітку, розпушування ґрунту та одночасного локального внесення добрив. Такі машини дають змогу скорочувати кількість проходів по полю, зменшувати витрати пального й уникати ущільнення орного шару, що безпосередньо впливає на продуктивність культур і довговічність ґрунтів [2].

Застосування систем точного землеробства (Precision Farming) стало ключовим чинником модернізації агровиробництва. Вони базуються на диференційованому внесенні добрив, точному позиціонуванні робочих органів і комп'ютерному контролю агротехнічних параметрів. Проте ефективність таких систем залежить не лише від наявності сенсорних або супутникових технологій, а й від відповідної техніки – зокрема культиваторів-підживлювачів, здатних адаптуватися до різних тягових засобів [3].

Особливу актуальність має розробка універсальної секції культиватора, яка може агрегатуватися як із традиційними колісними тракторами, так і з мостовими енергетичними засобами, що набувають поширення у точному землеробстві. Такий підхід забезпечує можливість використання єдиної базової конструкції в різних технологічних середовищах – стаціонарному, мобільному чи автоматизованому [4]. Це дозволяє знизити капітальні витрати господарств,

спростити сервісне обслуговування й підвищити універсальність машинного парку.

Локальне внесення добрив під час культивації також сприяє раціональнішому використанню ресурсів. За даними експериментальних досліджень, суміщення культивації та підживлення підвищує коефіцієнт використання поживних речовин і врожайність культур до 10–15 % порівняно з роздільним виконанням цих операцій [5]. Окрім економічних переваг, така технологія знижує ризики забруднення довкілля та втрати азотних сполук у ґрунтових водах.

Отже, обґрунтування параметрів і конструкції культиватора-підживлювача є актуальним науково-прикладним завданням, що відповідає світовим тенденціям автоматизації, точності й екологізації землеробства. Розробка такого агрегату забезпечить підвищення енергоефективності, зниження експлуатаційних витрат і гнучкість використання в системах як традиційного, так і мостового типу обробітку.

#### *Мета роботи*

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності технологічного процесу міжрядного обробітку та локального внесення мінеральних добрив шляхом розроблення універсального культиватора-підживлювача, придатного для агрегування як з традиційними колісними тракторами, так і з мостовими енергетичними засобами точного землеробства.

#### *Завдання кваліфікаційної роботи.*

- проаналізувати сучасний стан конструкцій культиваторів-підживлювачів і визначити основні тенденції їх розвитку.
- розробити кінематичну та силову схеми культиватора-підживлювача.
- виконати теоретичні дослідження робочих органів культиватора-підживлювача.

- обґрунтувати конструктивно-технологічні параметри секції культиватора, що забезпечує стабільну роботу при різних умовах агрегування.
- оцінити можливості використання розробленого культиватора в складі мостових машин точного землеробства.

*Об'єкт дослідження.* Процес міжрядного обробітку ґрунту з одночасним локальним внесенням добрив у системах точного землеробства.

*Предмет дослідження.* Конструктивні, кінематичні та технологічні параметри культиватора-підживлювача, що визначають якість обробітку ґрунту, рівномірність підживлення та енергоефективність агрегату.

*Наукова новизна досліджень:*

Наукова новизна полягає в обґрунтуванні параметрів і розробленні універсальної конструкції культиватора-підживлювача, секції якого можуть використовуватися як у традиційних тракторних агрегатах, так і в мостових машинах. Уперше запропоновано варіант модульної будови з можливістю швидкого переобладнання вузлів агрегування залежно від типу тягового засобу. Удосконалено методику розрахунку силових навантажень на робочі органи при комбінованій роботі з одночасним внесенням добрив.

*Практичне значення кваліфікаційної роботи.*

Результати дослідження мають прикладний характер і можуть бути використані при проектуванні, виготовленні та модернізації культиваторів-підживлювачів нового покоління. Запропонована конструкція дозволяє скоротити кількість проходів техніки по полю, знизити витрати пального та добрив, покращити рівномірність обробітку ґрунту й підвищити рентабельність виробництва.

*Апробація.* Карайда А.М. Обґрунтування параметрів та конструкції культиватора-підживлювача. Збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (21 листопада 2025 р.). Частина 3. Інтенсифікація сільськогосподарського і харчового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ, 2025.

## 1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 1.1. Технологічні особливості процесу міжрядного обробітку та локального внесення добрив

Міжрядний обробіток є однією з найважливіших операцій догляду за посівами, оскільки забезпечує оптимальні умови для росту та розвитку культурних рослин. Його основними завданнями є розпушування верхнього шару ґрунту, знищення бур'янів, поліпшення водно-повітряного режиму та створення сприятливих умов для дії мінеральних і органічних добрив. Поєднання міжрядної культивуації з одночасним внесенням добрив дозволяє комплексно реалізувати технологічний процес догляду за рослинами в один прохід, знижуючи кількість технологічних операцій, витрати палива та ступінь ущільнення ґрунту [1].

Агротехнічна сутність міжрядного обробітку. Під час росту сільськогосподарських культур поверхневий шар ґрунту схильний до утворення кірки, ущільнення та зниження його пористості. Це обмежує доступ повітря до кореневої системи, погіршує інфільтрацію вологи й сповільнює мінералізаційні процеси. Міжрядний обробіток покликаний ліквідувати ці негативні явища, розпушити ґрунт і підтримати його в активному аераційному стані.

Агротехнічна якість культивуації визначається низкою показників:

- глибиною обробітку (залежить від культури і фази її розвитку);
- ступенем розпушення та подрібнення ґрунту;
- збереженням рослин у рядках;
- кількістю знищених бур'янів;
- рівномірністю поверхні після проходу агрегату.

Для більшості просапних культур оптимальна глибина міжрядного розпушування становить 5–12 см. Під час першого проходу, коли коренева система ще слабо розвинена, глибина обробітку не перевищує 5–6 см, тоді як на

пізніших етапах її збільшують до 10–12 см. Надмірне заглиблення робочих органів може пошкодити корені рослин і призвести до втрати вологи [2].

Особливу роль відіграє кут атаки лап культиватора. Якщо він занадто малий, ґрунт не розпушується належним чином, а якщо надто великий – відбувається перевертання шарів і утворення великих брил. Правильний вибір кута атаки забезпечує дрібногрудочкувату структуру ґрунту, що сприяє кращому збереженню вологи.

Знищення бур'янів – один із головних показників ефективності міжрядного обробітку. При правильно підбраному режимі руху та конфігурації лап коефіцієнт знищення бур'янів сягає 85–95 %. Для цього робочі органи мають працювати зі швидкістю 6–10 км/год, щоб підрізати бур'яни у фазі сім'ядоль або перших листків.

Технологічні умови суміщення міжрядної культивації та внесення добрив

Поєднання культивації з локальним внесенням мінеральних добрив дозволяє виконувати дві операції одночасно – розпушування і підживлення, що є економічно вигідним і технологічно доцільним. Такий підхід зменшує кількість проходів техніки по полю, скорочує витрати палива до 25 %, зменшує ущільнення ґрунту та підвищує рівномірність розподілу добрив [3].

У більшості сучасних агрегатів для підживлення використовують стрічкове або стрічково-осередкове внесення. Добрива закладаються в ґрунт паралельно до рядка на відстані 6–10 см від рослини і на глибину 5–12 см. Такий спосіб забезпечує оптимальну концентрацію поживних речовин у зоні активного розвитку кореневої системи, мінімізуючи втрати від вимивання.

Системи подачі добрив можуть бути:

- гравітаційні (для сипких гранульованих сумішей);
- пневматичні (для точного дозування і розподілу);
- гідравлічні (для рідких добрив і аміачної води).

Для рідких розчинів використовують спеціальні аплікатори, які формують вузьку струминну смугу на заданій глибині. При цьому важливо забезпечити

стабільність тиску в системі подачі, щоб уникнути надмірного зволоження або пошкодження коренів.

Ефективність підживлення залежить також від однорідності дозування. Сучасні культиватори обладнуються дозаторами з приводом від вала відбору потужності або електроприводом, керованим мікроконтролером. Це дає змогу підтримувати постійну витрату добрив незалежно від швидкості руху агрегату.

Для підвищення точності внесення дедалі частіше застосовуються системи автоматичного регулювання дозування, які отримують інформацію від датчиків швидкості, вологості ґрунту або бортових GPS-модулів. На основі цих даних система коригує обсяги внесення у реальному часі. Такі рішення є складовою концепції “розумного поля” (Smart Field) у точному землеробстві [4].

#### Вплив параметрів обробітку на агрофізичний стан ґрунту

Під час міжрядного обробітку ґрунт зазнає значних механічних навантажень. Якщо глибина розпушування або швидкість руху робочих органів підібрані неправильно, це може призвести до утворення підшви плуга або ущільненого шару під зоною обробітку. Тому важливо враховувати такі параметри, як:

- питомий опір ґрунту (0,6–1,2 МПа);
- вологість ґрунту під час обробітку (12–18 %);
- швидкість руху агрегату (5–10 км/год);
- кут нахилу та форма лапи.

Відомо, що найкращі результати досягаються при роботі у вологому, але не переущільненому ґрунті. При вологості понад 25 % культивація втрачає ефективність – ґрунт прилипає до робочих органів, відбувається його зминання, а не розпушення. У надто сухому стані спостерігається підвищене енергоспоживання через зростання опору ґрунту.

Застосування комбінованих лап (долото з боковими крилами) дозволяє розширити зону обробітку без збільшення глибини, що сприяє кращій аерації ґрунту. Додаткове обладнання лап підживлюючими соплами забезпечує

локальне внесення гранул (тук) добрив у розпушений шар, зменшуючи втрати азоту при контакті з повітрям.

*Механізми підживлення та дозування.* Для внесення добрив у складі культиваторів-підживлювачів найчастіше використовуються дозувальні апарати шнекового, котушкового або дискового типу. Їх завдання – рівномірно подавати гранульовані або рідкі добрива в розподільну систему.

У більш складних агрегатах застосовуються пневмодозатори із центральним вентилятором, який подає добрива повітряним потоком через трубопровід до кожної секції. Така система забезпечує точність розподілу навіть на великій ширині захвату (6–12 м).

Дозування здійснюється пропорційно швидкості руху агрегату. Для цього використовують енкодери, які подають сигнал на контролер, що регулює оберти дозатора. Це дозволяє підтримувати стабільну норму внесення, навіть якщо агрегат змінює швидкість у межах 20–40 %.

Під час внесення рідких добрив особливу увагу приділяють антикорозійному захисту елементів системи. Для трубопроводів і дозуючих вузлів застосовують полімерні матеріали або нержавіючу сталь. Насоси вибирають із можливістю регулювання подачі, найчастіше мембранно-поршневого або діафрагмового типу.

Сучасні розробки передбачають також інтеграцію сенсорів тиску, витрати та заповнення баків, що дозволяє контролювати процес підживлення з кабіни трактора або мостової машини. Застосування електронних систем моніторингу мінімізує людський фактор і підвищує стабільність агротехнічних показників [5].

*Енергетична оцінка процесу.* Процес міжрядної культивації з підживленням належить до енергоємних операцій у рослинництві. Частка енерговитрат на цю операцію може сягати 10–15 % у загальній структурі польових робіт [6]. Тому важливо мінімізувати питомі витрати енергії без погіршення якості обробітку.

Зменшення енергоємності досягається:

- правильним вибором глибини обробітку залежно від фази росту культури;
- оптимізацією швидкості руху (7–9 км/год);
- зменшенням маси рухомих елементів секції;
- застосуванням еластичних підвішувальних або паралелограмних механізмів, що знижують вібрації;
- використанням пневматичних коліс або опорних котків для стабілізації глибини.

Експериментальні дані показують, що перехід від традиційної культивування до комбінованої (з одночасним внесенням добрив) дозволяє скоротити витрати палива в середньому на 0,5–0,8 л/га, що за великих площ забезпечує відчутний економічний ефект [6].

*Роль автоматизації в технологічному процесі.* Сучасні системи точного землеробства активно впроваджують автоматизовані комплекси, які координують роботу культиватора з навігаційними системами GPS або RTK. Це дає змогу мінімізувати перекриття смуг, забезпечити рівномірність обробітку та точність внесення добрив у межах  $\pm 2$  см.

Автоматичне керування дозуванням добрив дозволяє формувати карти завдання для кожного поля. На основі даних дистанційного зондування або агрохімічних аналізів система задає змінну норму внесення – більшу на ділянках з дефіцитом елементів живлення і меншу на родючих ділянках. Такий підхід знижує загальні витрати добрив на 10–20 % без втрати врожайності [7].

Інтеграція автоматизації з мостовими машинами відкриває нові перспективи. Мостові енергетичні платформи, що рухаються по рейкових коліях, дозволяють виконувати міжрядну культивування та підживлення без ущільнення ґрунту колесами. Встановлення модульних секцій культиватора-підживлювача на такій платформі забезпечує високу стабільність глибини, рівномірність внесення та точність позиціонування робочих органів.

Міжрядний обробіток із локальним внесенням добрив є складним багатофакторним процесом, який об'єднує механічну, агрохімічну й енергетичну складові. Його ефективність визначається точністю дотримання глибини обробітку, рівномірністю підживлення, мінімізацією втрат поживних речовин і стабільністю технологічних параметрів.

Поєднання цих операцій у межах одного агрегату забезпечує значну економію ресурсів, зменшення негативного впливу на ґрунт і підвищення врожайності культур. Подальший розвиток технології пов'язаний із створенням універсальних, адаптивних і автоматизованих культиваторів-підживлювачів, які можуть працювати як у складі традиційних тракторних агрегатів, так і мостових енергетичних машин точного землеробства.

## 1.2 Сучасний стан та напрями розвитку машин для міжрядного обробітку ґрунту і підживлення культур

Міжрядний обробіток ґрунту та локальне внесення добрив є важливими складовими технологій вирощування сільськогосподарських культур. Вони забезпечують збереження вологи, поліпшення аераційного режиму, активізацію мікробіологічних процесів у ґрунті й ефективне використання поживних речовин [1]. Від конструктивного рівня машин для цих процесів залежить не лише урожайність, а й енергоефективність виробництва та екологічна сталість агротехнологій.

Перші механізовані культиватори з'явилися наприкінці XIX – на початку XX століття. Вони мали жорстко закріплені лапи, невеликий робочий захват і були призначені переважно для прополювання [8]. На рисунку 1.1 приведено одну із таких самохідних конструкцій просапного культиватора, що дозволяв оператору досить точно позиціонувати робочі органи відносно рослин.



Рисунок 1.1 – Самохідний культиватор International Harvester (1916 рік)

З розвитком тракторного парку в середині ХХ століття з'явилися універсальні культиватори типу КРН, які могли регулювати глибину обробітку, відстань між секціями та забезпечували обробіток різних культур [9].

У подальшому розвиток машин орієнтувався на комбінування технологічних операцій: міжрядне розпушування, підрізання бур'янів, боронування та одночасне внесення добрив. Це дозволило підвищити ефективність використання пального, зменшити кількість проходів по полю та покращити рівномірність розподілу поживних речовин.

Однак традиційні культиватори мали низку недоліків – значну вібрацію секцій, нестабільну глибину ходу робочих органів, нерівномірне підживлення та пошкодження культур у зоні рядка. Ці проблеми зумовили потребу у створенні нового покоління агрегатів, здатних забезпечувати точність і адаптивність до умов поля [3].

На сучасному етапі міжрядні культиватори розвиваються за кількома ключовими напрямками:

- підвищення точності розпушування та підживлення;
- автоматизація керування секціями;
- універсальність агрегування з різними типами тягових засобів;

- енергозбереження та зниження ущільнення ґрунту.

В Україні серійно виготовляються й експлуатуються культиватори типу КРН-4,2, КРН-5,6, КРНВ-5,6, КРН-8,4, які широко використовуються у господарствах для міжрядного обробітку кукурудзи, буряку, соняшнику та інших просапних культур. Їхні конструкції постійно вдосконалюються – додаються системи локального внесення гранульованих і рідких добрив, пружинні стабілізатори глибини, опорні колеса, захисні диски та механізми плаваючого копіювання поверхні [4]. Розглянемо характеристику таких культиваторів на прикладі моделі Альтаір від Українського виробника ТМ Ельворті. Культиватор-підживлювач КРН-4,2 ALTAIR призначений для міжрядного розпушування ґрунту, знищення бур'янів і локального внесення мінеральних добрив під час вирощування просапних культур – кукурудзи, соняшнику, сої, буряку тощо. Машина має робочу ширину 4,2 м і обробляє шість міжрядь із шириною 70 см [9].

Конструкція рами секційна, з паралелограмною підвіскою, що забезпечує стабільну глибину обробітку (40–120 мм) навіть на нерівних ділянках. Робочі секції оснащені опорними колесами, підпружиненими механізмами та змінними робочими органами – лапами-бритвами, стрілочастими лапами чи долотами. У зоні рядка встановлені захисні диски, які запобігають засипанню культур ґрунтом.

Для підживлення передбачено систему дозування гранульованих або рідких добрив, що подаються через тукові сошники безпосередньо в зону коренів. Норма внесення регулюється в широкому діапазоні (50–250 кг/га), що дозволяє адаптувати агрегат до конкретних культур і фаз росту.

Культиватор агрегується з тракторами потужністю 80–90 к. с. (МТЗ-80/82, ЮМЗ-8040 тощо) і забезпечує продуктивність 2,5–3,5 га/год при швидкості 6–10 км/год. Відзначається простою регулюванням, надійною рамою, зручністю обслуговування та можливістю встановлення додаткових елементів – прополювальних дисків або ротаційних зірочок.

Завдяки поєднанню розпушування й точного внесення добрив КРН-4,2 ALTAIR підвищує ефективність живлення рослин, скорочує витрати пального та добрив, забезпечує високу агротехнічну якість і відповідає вимогам сучасних технологій точного землеробства [1, 2].



Рисунок 1.2 – Культиватор підживлювач КРН-4,2 ALTAIR від Ельворті ТМ (Україна)

Поряд із цим на ринку активно представлені зарубіжні культиватори-підживлювачі. Для прикладу розглянемо особливості конструкції та основні параметри культиватора підживлювача Einböck Chopstar (рис. 1.3) [10]. Це високоточна машина австрійського виробництва, призначена для міжрядного обробітку просапних культур з можливістю локального внесення мінеральних або органічних добрив. Машина належить до преміум-класу техніки точного землеробства й широко використовується у країнах ЄС для вирощування кукурудзи, сої, буряку, соняшнику, овочевих культур тощо.

Основне завдання культиватора – розпушування ґрунту між рядами, знищення бур'янів, покращення повітряного обміну та внесення поживних речовин у прикореневу зону. Машина ефективно працює в системах контрольованого руху техніки (CTF), у тому числі на фермах, які впроваджують технології точного позиціонування (RTK-GPS).

Культиватор застосовується для культур із міжряддям від 25 до 75 см і може налаштовуватися під конкретний агрофон.



Рисунок 1.3 – Культиватор підживлювач Einböck Chopstar

Ще одним перспективним конструктивним рішенням запропонованим науковцями Данії є культиватор підживлювач Kongskilde Vibro Crop [11]. Культиватор-підживлювач належить до високоефективних машин для міжрядного обробітку ґрунту в посівах просапних культур – кукурудзи, соняшнику, сої, цукрових буряків та овочів. Його основна функція – розпушування поверхневого шару ґрунту, руйнування ґрунтової кірки й знищення бур'янів у міжряддях без пошкодження культурних рослин. За потреби машина може комплектуватися системою локального внесення мінеральних або рідких добрив, що дозволяє суміщати кілька технологічних операцій в одному проході.

Робочі секції закріплені на паралелограмних підвісках, які забезпечують точне копіювання рельєфу поля й стабільну глибину обробітку. Кожна секція має опорне (копіювальне) колесо і набір вібраційних S-подібних лап, що створюють коливальні рухи під час роботи. Завдяки цьому лапи не просто підрізають бур'яни, а й легенько вібрують, розрихлюючи ґрунт і не допускаючи його ущільнення.

Робочі органи можуть бути оснащені захисними щитками або дисками, які не дозволяють ґрунту засипати рослини. Вібраційні елементи виконані з пружинної сталі, що забезпечує самочищення й зменшує налипання землі.

Основна рама виконується у секційно-модульному варіанті – від 4 до 12 міжрядь, із можливістю гідравлічного складання для транспортування. Машина агрегується з тракторами потужністю від 60 до 150 к. с., робоча швидкість становить 6–15 км/год, глибина розпушування – 20–80 мм.

Хоча базова версія Vibro Crop є механічним культиватором, вона може працювати у складі комбінованої системи – із переднім або заднім бункером для добрив (*Kongskilde Fertilizer Applicator*). Через дозатори та гнучкі шланги гранульовані або рідкі добрива подаються безпосередньо в зону міжряддя, що підвищує ефективність їх засвоєння.

Для автоматичного наведення по рядках передбачена опція системи камерного керування (*Vision Control* або *Row Guard*), яка коригує положення рами залежно від відхилень траєкторії руху (рис. 1.4). Це особливо корисно на посівах з нерівномірними сходами.



Рисунок 1.4 - Культиватор підживлювач Kongskilde Vibro Crop

Багаторічна праця науковців з Британії увінчалася успіхом та створенням культиватора з машинним зором що дозволяє виконувати прополювання не тільки в міжрядді а і у рядку. Система Garford Robocrop (рис. 1.5) є однією з перших у світі промислових розробок у галузі машинного зору для міжрядного обробітку ґрунту. Вона була створена британською компанією *Garford Farm Machinery Ltd* і призначена для автоматичного керування культиваторами та підживлювачами під час роботи в посівах просапних культур [12].

Основою системи є камера високої роздільної здатності, яка в режимі реального часу розпізнає рядки культур, відрізняючи їх від бур'янів за кольором, формою та просторовим розташуванням. Отримані зображення обробляються спеціальним алгоритмом, що визначає точне положення рядків і передає команди гідравлічному або електромеханічному коректору траєкторії. Завдяки цьому машина автоматично утримує робочі органи культиватора строго між рядками навіть при відхиленнях трактора або нерівномірних сходах.



Рисунок 1.5 – Система Garford Robocrop [12]

Система Garford Robocrop може працювати з міжряддями від 15 до 80 см, забезпечуючи точність наведення до  $\pm 2$  см. У комплектації також передбачено модуль для автоматичного керування робочими органами, що дозволяє вимикати окремі ряди при вході в край поля або на розворотах, що мінімізує пошкодження культур.

Використання системи *Garford Robocrop* значно підвищує якість прополювання так завдяки прополюванню в рядках фермери можуть відмовитися від використання гербіцидів та зменшити хімічне навантаження при вирощуванні продукції. Ще одним плюсом системи є зменшення навантаження на оператора. У поєднанні з сучасними культиваторами вона є ключовим елементом мехатронних систем точного землеробства, спрямованих на автоматизацію технологічних процесів та зменшення ручної праці.

Ці машини працюють з точністю до 2–3 см, можуть змінювати норму внесення добрив у режимі реального часу (VRA) і сумісні з системами моніторингу врожайності. Вони задають орієнтир для вдосконалення вітчизняних зразків техніки.

Ключова тенденція розвитку – інтеграція систем машинного зору для розпізнавання рядків культур і бур'янів. Системи *Garford Robocrop* (Велика Британія), *Tillett & Hague Camera Guidance* (США) та *NEXAT Vision System* (Німеччина) дають змогу автоматично утримувати робочі органи в межах міжряддя навіть при нерівномірних сходах [7].

Паралельно розвиваються гідравлічні та електромеханічні системи регулювання глибини, які підтримують стабільність роботи незалежно від коливань поверхні поля. Це особливо важливо під час внесення добрив на різних типах ґрунтів.

Значну увагу приділено енергоощадним рішенням: застосовуються легкі матеріали (алюмінієві сплави, високоміцні сталі), вдосконалені лапи зі зниженим опором руху, а також модульна побудова секцій, що полегшує агрегування з тракторами різної потужності.

Сучасні агрегати оснащуються бункерами для добрив з дозаторами електроприводу, що синхронізуються з навігаційними системами, – це дозволяє диференційовано подавати мінеральні речовини в зону живлення рослин.

### 1.3 Аналіз конструкцій дозаторів туків

У сучасних умовах сільськогосподарського виробництва процес внесення твердих мінеральних добрив і підживлення культур здійснюється здебільшого з використанням машин відцентрового типу. Їх принцип дії базується на розкиданні добрив обертальними дисками, а регулювання дози проводиться зміною площі вихідного отвору за допомогою шиберної заслінки. Такий підхід забезпечує ефективність при вирощуванні культур суцільного способу сівби, проте він малоприматний для міжрядного обробітку та локального внесення поживних речовин.

Зарубіжні виробники активно вдосконалюють дозувальні системи. Зокрема, компанія Amazone розробила систему Argus Twin (рис. 1.6) [13], що встановлюється на низку розкидачів мінеральних добрив. Вона дає змогу контролювати поперечний розподіл речовини двома дисками за допомогою сенсорного контролю.



Рисунок 1.6 – Система контролю та регулювання рівномірності розподілу тук Argus Twin

Компанії RAUH і KUHN впровадили у свої машини блоки керування QUANTRON A/E-2, які автоматично регулюють положення заслінок залежно від швидкості руху трактора, а також дозволяють відключати окремі секції під час роботи, запобігаючи перевитраті добрив.

Компанії Sulky та Rabe застосовують інтелектуальну систему STOP & GO, яка працює у взаємодії з навігаційною системою трактора. Такий підхід забезпечує автоматичне відкривання й закривання дозаторів на розворотах і технологічних коліях, що дає змогу уникати передозування або пропусків. Ці рішення демонструють тенденцію переходу до автоматизованого керування подачею добрив, яке враховує швидкість, координати та положення агрегату на полі.

Сучасні дозувальні системи класифікують на кілька основних груп: катушкові, барабанні, тарільчасті, спіральні-гвинтові та стрічкові [14]. Кожен тип має свої конструктивні особливості, які визначають точність дозування, стабільність подачі та придатність до різних фракцій добрив (рис. 1.7).

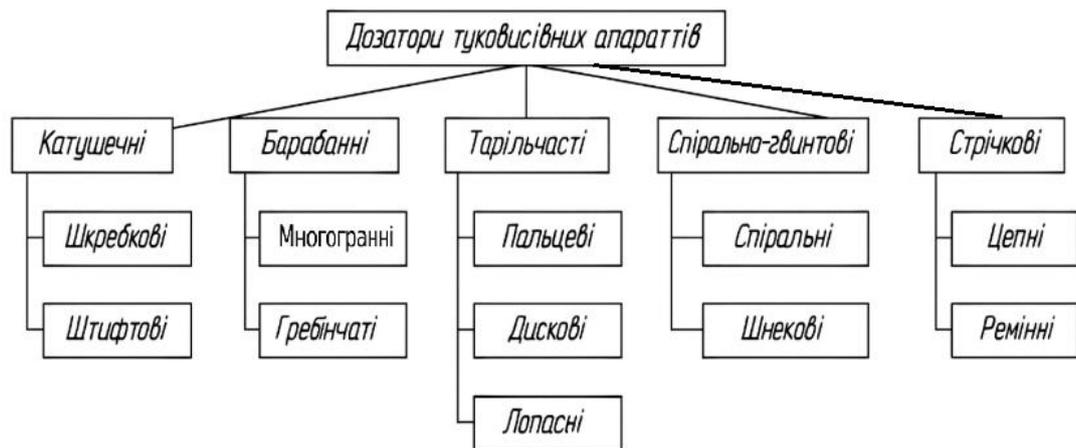


Рисунок 1.7 – Класифікація дозуючих пристроїв

*Котушкові дозатори.* Найбільш поширеними є катушкові туковисівні апарати з катушково-штифтовими дозаторами (рис. 1.8). Їхній принцип роботи полягає в тому, що тукидобрив вибираються з бункера 1 за допомогою обертової катушки 6. На її поверхні розташовані штифти у два ряди зі зміщенням один відносно одного, що забезпечує безперервну подачу матеріалу. Регулювання дози здійснюється зміною швидкості обертання катушки або положення шиберної заслінки 1, яка визначає площу живильного вікна [15].

До недоліків таких систем належать відносно низька точність дозування, залежність продуктивності від геометрії штифтів і кроку між ними, а також

схильність до забивання при використанні вологих або злежаних добрив. Проте перевагою є простота конструкції, надійність і низька енергоємність приводу.

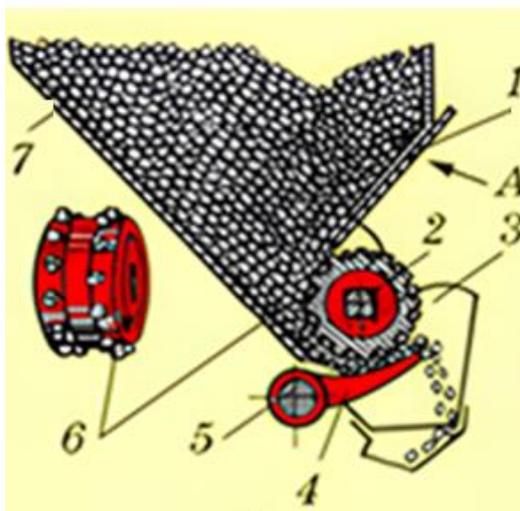


Рисунок 1. 8 – Котушковий дозатор:

1 – заслінка; 2 – привідний вал; 3 – напрямний канал; 4 – регулювальний язичок; 5 – вал; 6 – котушка з штифтами; 7 – бункер

*Тарільчасті та стрічкові дозатори.* Меншого поширення набули тарільчасті та стрічкові системи. У тарільчастих дозаторах (рис. 1.9) замість котушки встановлені обертові тарілки 3. Норма внесення регулюється за допомогою гідроциліндра 2 зміною висоти розміщення тарілки 3 а відповідно і зазора між нею та бункером 1.

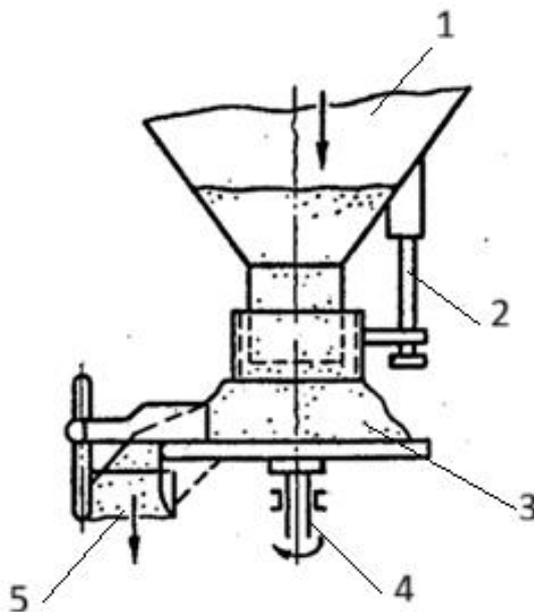


Рисунок 1.9 – Тарільчастий дозатор

Під час роботи тарілка приводиться в обертовий рух валом 4 тукумінеральних добрив сходять з тарілки через край в один або два тукопроводи 5. Такі системи забезпечують неперервну подачу матеріалу, але характеризуються низькою рівномірністю розподілу та можливістю подрібнення тук при малому зазорі між тарілкою та бункером.

Стрічкові дозатори функціонують за принципом транспортування добрив рухомою стрічкою або ланцюгом. Цей тип конструкції використовується рідше через складність герметизації й обмежену точність при малій подачі, проте він ефективний для добрив із низькою сипучістю.

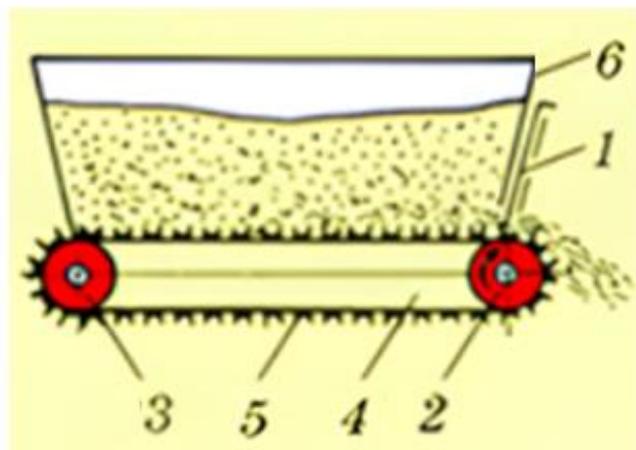


Рисунок 1.10 – Стрічковий дозатор:

- 1 – заслінка; 2 – привідний вал; 3 – ведений вал;
- 4 – остов; 5 – стрічка або ланцюг; 6 – бункер

*Шнекові дозувальні пристрої.* Шнекові дозатори відзначаються простотою конструкції, надійністю й високою стабільністю дозування. Вони можуть бути відкритого, закритого або кільцевого типу, що дозволяє адаптувати їх до різних умов роботи. Під час обертання шнека тукипереміщуються уздовж гвинтової поверхні, а надлишок матеріалу за допомогою зворотного шнека або нахиленого каналу повертається у бункер, запобігаючи перевитраті добрив.

Сівалки й культиватори зі шнековими дозаторами виробляються провідними компаніями – Amazone-Werke, Diadem, Lister – та характеризуються стабільністю подачі незалежно від вологості й щільності матеріалу (рис. 1.11) [16].

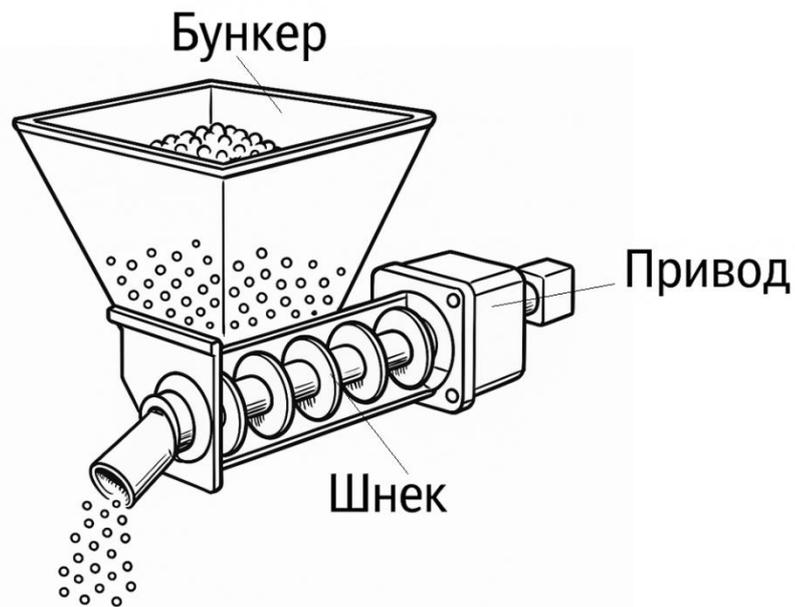


Рисунок 1.11 – Шнековий дозатор

Проведений аналіз показує, що найбільш перспективним напрямом удосконалення дозаторів культиваторів-підживлювачів є комбінування переваг котушкових і шнекових систем, а також автоматизація процесу дозування. Це дозволить підвищити рівномірність внесення, зменшити втрати та забезпечити точне живлення культур у системах мостового та точного землеробства.

#### 1.4 Особливості використання культиваторів-підживлювачів в мостового технології точного землеробства

Сучасні системи точного землеробства спрямовані на максимальне підвищення ефективності використання ресурсів – енергії, вологи, добрив і часу. Одним із найперспективніших напрямів такого підходу є мостова технологія, що передбачає відокремлення зони руху техніки від зони росту культур. У цій системі всі технологічні операції виконуються мостовими або рейковими агрегатами, які рухаються по сталих коліях, не ущільнюючи орний шар ґрунту [17].

У контексті мостової технології культиватори-підживлювачі набувають нових функціональних властивостей і вимагають конструктивної адаптації до умов автономної або напівавтоматичної роботи. Вони стають не просто знаряддями догляду за посівами, а мехатронними елементами системи точного позиціонування, що забезпечують диференційоване оброблення та внесення добрив з високою точністю.

У традиційних технологіях міжрядний обробіток здійснюється тракторами, які багаторазово проходять полем, ущільнюючи до 40 % його площі. Це погіршує повітряний і водний режим ґрунту, уповільнює розвиток кореневої системи рослин та знижує ефективність добрив. Використання мостової системи усуває ці недоліки: культиватор переміщується вздовж постійних колій, а робочі секції охоплюють велику площу поля без повторного навантаження на ґрунт.

Культиватори-підживлювачі в такій системі виконують декілька взаємопов'язаних завдань:

- розпушування міжрядь без пошкодження рослин;
- збереження структури ґрунту в зоні росту;
- подавання поживних речовин локально до кореневої системи;
- інтеграція з системами машинного зору й навігації для точного позиціонування.

Завдяки стабільності руху мостового агрегату забезпечується рівномірність глибини обробітку по всій ширині, а вібраційні або ротаційні лапи культиватора можуть працювати з мінімальними вібраційними коливаннями. Це дозволяє поєднувати механічну прополку з внесенням мікродоз добрив, що є одним із базових принципів точного землеробства.

При роботі в складі мостової машини культиватор-підживлювач повинен мати низку особливостей, які відрізняють його від класичних моделей, що агрегуються з тракторами:

1. Мала маса секцій – для зниження навантаження на несучі елементи мосту, особливо якщо його рама виконана з легких матеріалів.

2. Підвіска плаваючого типу – робочі секції повинні автоматично копіювати поверхню поля незалежно від жорсткої геометрії ферми.

3. Модульна будова – окремі секції кріпляться до несучої балки через універсальні вузли, що дозволяє швидко змінювати кількість міжрядь або ширину захвату.

4. Використання електрогідравлічних або пневматичних приводів – замість механічних тяг, які неможливо застосувати на довгих прогонах мостової системи.

5. Мехатронна інтеграція – оснащення датчиками положення, камерами машинного зору, ультразвуковими сенсорами висоти, контролерами подачі добрив.

Такі рішення дозволяють керувати культиватором дистанційно – без участі оператора в кабіні, а також здійснювати автоматичне регулювання глибини та точне дозування добрив за даними з карт урожайності чи датчиків стану рослин.

У мостових машинах доцільно застосовувати системи візуального наведення типу Garford Robocrop або NEXAT Vision, які ідентифікують рядки культур та коригують положення секцій культиватора. Це особливо важливо при роботі в умовах нерівномірних сходів або на схилах. Камери машинного зору аналізують зображення поверхні поля, розпізнають зелений спектр рослин і формують сигнал керування на гідророзподільники, які зміщують секції відносно центру ряду.

Таке керування забезпечує точність до  $\pm 2-3$  см, що дозволяє обробляти ґрунт у безпосередній близькості від рослин без ризику пошкодження. Для мостових систем точного землеробства це є критичним параметром, адже їх робоча ширина може сягати 12–18 м, а похибка в кілька сантиметрів на такій довжині суттєво впливає на якість обробітку.

Використання культиваторів-підживлювачів у мостовій технології дає низку суттєвих переваг:

- Зменшення ущільнення ґрунту – лише 10–15 % площі поля піддається тиску коліс; решта зберігає природну пористість.
- Покращення повітряно-водного режиму – коренева система отримує більше кисню, а випаровування вологи зменшується.
- Енергозбереження – зниження тягового опору та кількості проходів по полю дозволяє економити до 20–25 % пального.
- Підвищення ефективності добрив – локальне внесення дає можливість скоротити їхню загальну норму на 15–30 %, зберігаючи той самий рівень урожайності.
- Сумісність із автоматизованими системами – завдяки сенсорному контролю положення секцій і електронним дозаторам, які працюють за принципом “Variable Rate Application”.

Екологічний ефект полягає не лише у зменшенні споживання ресурсів, але й у зниженні викидів CO<sub>2</sub>, оскільки містова технологія скорочує потребу у важкій техніці, а енергоживлення може забезпечуватись від сонячних батарей або акумуляторних модулів.

Подальший розвиток конструкцій культиваторів-підживлювачів у мостових системах пов'язаний із упровадженням адаптивних мехатронних комплексів, здатних змінювати режим роботи в реальному часі залежно від показників датчиків вологості, щільності ґрунту та стану рослин. Перспективним напрямом є створення автономних секцій із електроприводами, що працюють незалежно одна від одної, а також інтеграція з GIS-системами для автоматичного формування карт завдань на обробіток.

Такі рішення відкривають шлях до створення повністю автоматизованих мостових ферм, де культиватор-підживлювач є одним із ключових робочих модулів поряд із сівалками, обприскувачами й збиральними механізмами. В результаті реалізується основна мета точного землеробства – зменшити людський фактор, підвищити точність і забезпечити екологічну стабільність агросистеми.

## 1.5 Висновки

У результаті аналізу встановлено, що міжрядний обробіток із локальним внесенням добрив є ключовою операцією, від якої залежать урожайність, енергоефективність і стан ґрунту. Сучасні культиватори-підживлювачі поєднують кілька процесів в одному проході, що зменшує витрати палива, кількість проходів і ущільнення орного шару. Розвиток техніки провідних виробників (Einböck, Kongskilde, Garford, Ельворті ТМ) спрямований на підвищення точності, автоматизацію дозування та інтеграцію машинного зору; особливо перспективним є застосування в мостових системах точного землеробства.

Разом із тим виявлено критичну проблему, яку вирішує дана робота: забезпечення рівномірності внесення та високої точності дозування добрив у змінних польових умовах. Для її розв'язання передбачено розробку та обґрунтування дозуючого пристрою культиватора-підживлювача, здатного стабілізувати подачу (незалежно від швидкості руху, вологи й гранулометрії) і працювати в контурі керування за принципами VRA. Очікуваний результат – підвищення однорідності живлення рослин, зменшення перевитрат добрив і поліпшення агротехнічної якості обробітку в умовах мостових технологій.

## 1.6 Мета і завдання досліджень

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності технологічного процесу міжрядного обробітку та локального внесення мінеральних добрив шляхом розроблення універсального культиватора-підживлювача, придатного для агрегування як з традиційними колісними тракторами, так і з мостовими енергетичними засобами точного землеробства.

*Завдання кваліфікаційної роботи.*

- проаналізувати сучасний стан конструкцій культиваторів-підживлювачів і визначити основні тенденції їх розвитку.
- розробити кінематичну та силову схеми культиватора-підживлювача.
- виконати теоретичні дослідження робочих органів культиватора підживлювача.
- обґрунтувати конструктивно-технологічні параметри секції культиватора, що забезпечує стабільну роботу при різних умовах агрегаткування.
- оцінити можливості використання розробленого культиватора в складі мостових машин точного землеробства.

## 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Конструктивне рішення культиватора-підживлювача

Проведений огляд сучасних машин для міжрядного обробітку та локального внесення мінеральних добрив показав, що ефективність технологічного процесу визначається не лише типом робочих органів, а й комплексною взаємодією механічних, технологічних і дозувальних елементів агрегату. У сучасних конструкціях переважають секційні модульні системи, які забезпечують стабільність глибини, адаптивність під різні культури та можливість одночасного внесення добрив у прикореневу зону.

Аналіз технічних рішень виробників Einböck, Kongskilde, Elvorti, а також роботизованих систем Garford Robocrop свідчить про поступовий перехід до машин з високою точністю роботи, що оснащуються сенсорними модулями, камерами і електронними дозаторами. Паралельно з цим зростає потреба у конструкціях, які можна агрегатувати не лише з тракторними енергетичними засобами, але й з мостовими агромашинами, де відсутнє ущільнення ґрунту та потрібне точне позиціонування робочих органів.

Враховуючи результати цього аналізу, конструкція розроблюваного культиватора-підживлювача повинна відповідати таким вимогам:

Враховуючи результати цього аналізу, конструкція розроблюваного культиватора-підживлювача повинна відповідати таким вимогам:

- універсальність агрегування – можливість роботи як з колісним трактором, так і з мостовою платформою;
- висока стабільність глибини, що досягається паралелограмною підвіскою;
- можливість точного дозування добрив у змінних умовах;
- мінімальне ущільнення ґрунту і низький тяговий опір;
- модульність робочих секцій для різної ширини міжрядь;
- простота обслуговування та налаштування.

На основі цих вимог розроблено конструктивно-технологічну схему культиватора-підживлювача (рис. 2.1), вибір матеріалів і компонування дозувальної системи, що забезпечує надійність і рівномірність внесення гранульованих (тук) та рідких препаратів.

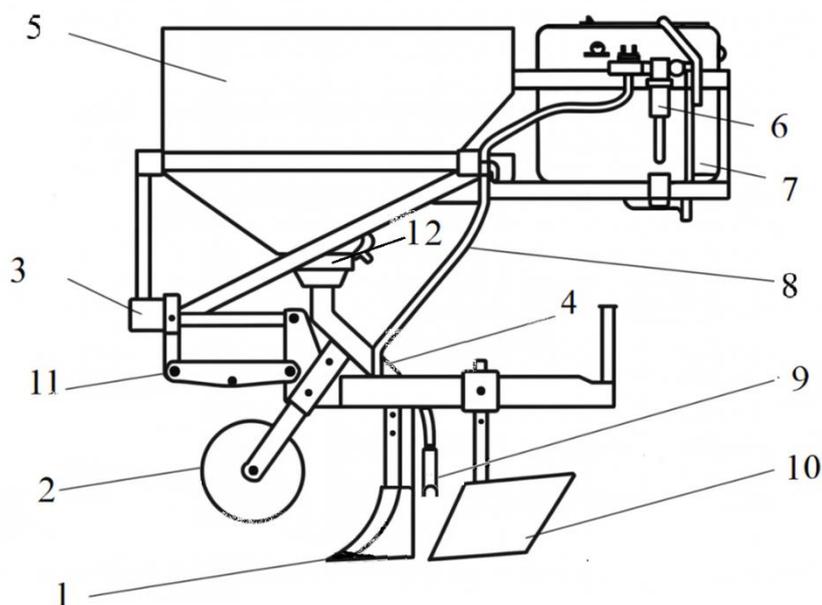


Рисунок 2.1 – Конструктивне рішення універсального культиватора-підживлювача

1 – робочий орган (лапа культиватора); 2 – опорний рушій; 3 – рама культиватора; 4 – тукопровід; 5 – бункер для туків; 6 – насос-дозатор рідких добрив; 7 – резервуар для рідких компонентів; 8 – магістраль подачі рідких добрив; 9 – розпилювач-форсунка; 10 – загортачі; 11 – паралелограмна підвіска; 12 – дозатор туків

Основою машини є секційно-модульна рама 3 коробчастого перерізу, що забезпечує жорсткість конструкції та рівномірний розподіл навантаження між робочими вузлами. Для агрегування застосовується універсальний вузол, який дозволяє встановлювати культиватор на тракторну навіску або мостову ферму. Це значно розширює сферу застосування машини. Секції кріпляться до рами через паралелограмні механізми 11. Така підвіска дозволяє виключити вплив вертикальних коливань рами на робочу глибину, що є критично важливим для

точного локального внесення добрив. Робочі органи культиватора представлені лапами сошниками 1, та лапами загортачами з боковими крилами 10, що дає змогу адаптувати машину під різні умови поля. Форма і матеріал робочих органів підібрані таким чином, щоб забезпечити мінімальний опір ґрунту та зменшити енергетичні витрати.

Ключовим елементом культиватора підживлювача є шнековий дозатор 12 з направленими витками, який забезпечує стабільність потоку незалежно від вологості та щільності тук. Детально конструкцію дозатора представлено на рисунку 2.2, що включає корпус із живильним отвором, шнек із постійним кроком, систему регулювальних заслінок і приводний електродвигун.

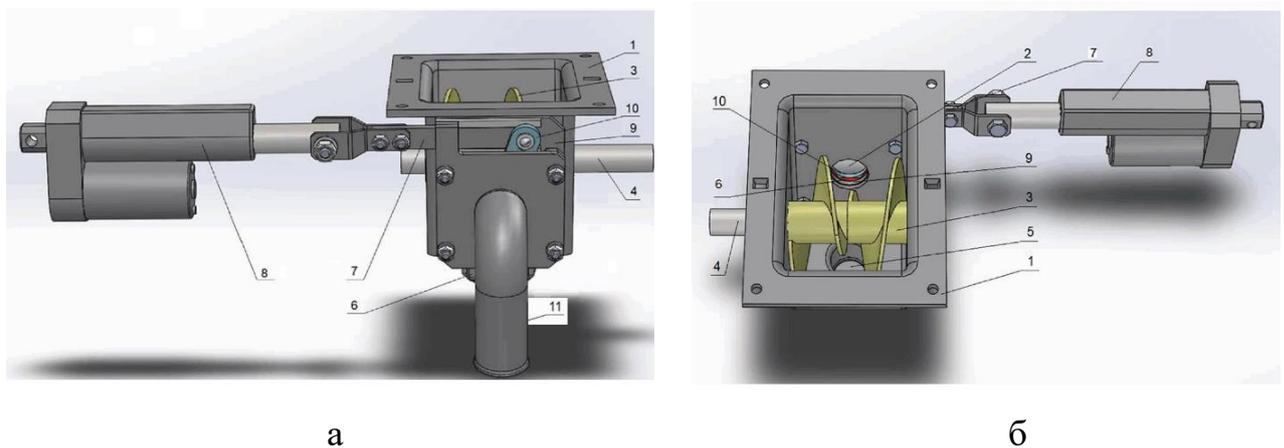


Рисунок 2.2 – Дозатор туків шнековий:

а -вид спереду; б – вид зверху; 1 – корпусу дозатора; 2 – отвір; 3 – шнек дозатора; 4 – привідний вал; 5 – розвантажувальне вікно; 6 – заслінка дозатора пристрою; 7 – важіль приводу заслінки; 8 – лінійний двигун (електроциліндр); 9 – стінка дозатора; 10 – водило заслінки; 11 – тукопровід

Принцип роботи полягає у переміщенні тук уздовж гвинтової лінії шнека 3 та регулювання подачі за допомогою мехатронної системи до складу якої входить заслінка 6, важіль 7, лінійний двигун 8 та блок керування та оптичні датчики витрати (на рисунку не вказані) . З дозуючого пристрою туки з

встановленою витратою надходить до тукопроводу 11, який подає матеріал у сошник-розсіювач.

Для рідких препаратів застосовано резервуар 7 (рис. 2.1), насос-дозатор 6 і магістралі подачі рідких добрив до розпилювача-форсунки 9. Завдяки блоку керування забезпечується налаштування оператором необхідної подачі рідких добрив відповідно до агротехнічних вимог.

## 2.2 Мехатронна інтеграція та автоматизоване керування

Мехатронна система керування культиватором-підживлювачем поєднує механічні, електронні, сенсорні та програмні модулі [18-20], що працюють як єдина інтегрована структура (рис. 2.3). Її метою є забезпечення стабільного міжрядного обробітку, точного дозування добрив та автоматичного утримання секцій над рядками культур. Основу системи становлять машинний зір, RTK-навігація та електромеханічні виконавчі механізми, які працюють у режимі реального часу.



Рисунок 2.3 – Структурна схема мехатронної системи культиватора-підживлювача

RTK-навігаційний модуль формує координати з точністю до  $\pm 2$  см, що дозволяє контролеру коригувати положення кожної секції незалежно. Модуль машинного зору аналізує розміщення рослин, відстань між рядками та відхилення траєкторії. Отримані дані передаються до центрального контролера ECU, який синхронізує роботу приводів секцій, шнекового дозатора та насоса рідких добрив.

Система дозування працює у режимі VRA (Variable Rate Application), тобто виконує змінне внесення залежно від карти-завдання або фактичного стану рослин, який визначається камерою. Показники швидкості руху агрегату, обертів шнека, рівня заповнення бункера та тиску в рідкій системі постійно вимірюються сенсорами. ECU у режимі реального часу коригує оберти шнека та подачу рідини, забезпечуючи стабільну норму внесення добрив.

До складу структурної схеми мехатронної системи входять:

- RTK-блок та антена супутникової навігації;
- модуль машинного зору (камера + процесор аналізу);
- центральний контролер ECU;
- датчики швидкості, положення, кута обертання, тиску та рівня добрив;
- CAN-шина для передачі даних між модулями;
- приводи секцій, шнековий електропривід, насос-дозатор;
- панель оператора НМІ для налаштування режимів.

Взаємодія цих компонентів забезпечує автоматизоване керування культиватором і дає можливість підтримувати високу точність міжрядного обробітку та дозування добрив. Інтеграція мехатронних систем мінімізує людський фактор і забезпечує рівномірне формування зони живлення культур.

### 2.3 Теоретичне дослідження параметрів дозуючого пристрою

Ефективність шнекового дозатора твердих мінеральних добрив визначається здатністю забезпечувати рівномірну, керовану та стабільну подачу матеріалу за різних режимів роботи. На точність дозування впливають

геометричні параметри вихідного отвору, гранулометричні властивості добрив, частота обертання шнека та ступінь заповнення робочої камери. Тому теоретичне дослідження закономірностей роботи дозатора є важливою умовою формування конструктивних рішень.

Шнековий механізм подачі працює таким чином, що туки, переміщуючись уздовж витків, надходять у розвантажувальне вікно, а звідти – у тукопровід. Регулювання норми внесення здійснюється двома способами: зміною площі перерізу вихідного отвору або коригуванням частоти обертання шнека [21, 22].

Загальна формула годинної подачі шнекового дозатора визначається:

$$P_{\text{г}} = 3600 \cdot F_{\text{пот}} \cdot v \cdot \rho \quad (2.1)$$

де  $P_{\text{г}}$  – подача добрив, кг/год;

$F_{\text{пот}}$  – площа поперечного перерізу потоку,  $\text{м}^2$ ;

$v$  – швидкість руху матеріалу, м/с;

$\rho$  – об'ємна маса добрив.

Площа перерізу  $F_{\text{пот}}$  через діаметр вписаної окружності  $D$  визначається:

$$F_{\text{пот}} = \psi \cdot \pi \sqrt{3} \cdot D^2 / 2 \quad (2.2)$$

де  $\psi$  – коефіцієнт заповнення дозуючої камери.

Швидкість руху тук уздовж шнека:

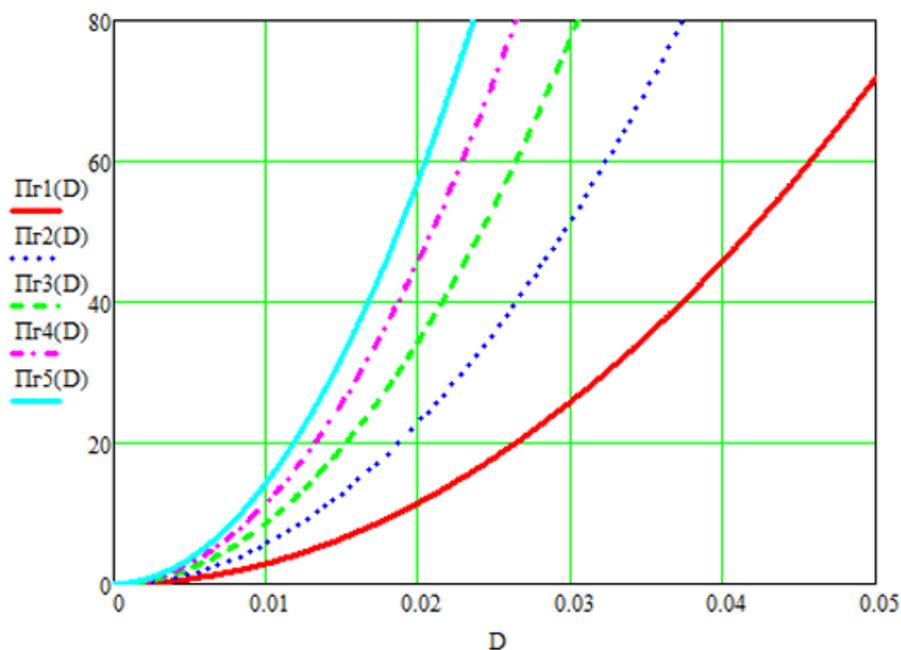
$$v = (\pi \cdot n_{\text{ш}} / 30) \cdot S_{\text{ш}} \quad (2.3)$$

Підставивши залежності у формулу подачі 2.1, отримуємо:

$$P_{\text{г}} = 60\sqrt{3} \cdot \pi \cdot \rho \cdot \psi \cdot n_{\text{ш}} \cdot S_{\text{ш}} \cdot D^2 \quad (2.4)$$

Ця формула показує, що подача зростає прямо пропорційно частоті обертання шнека й квадрату діаметра вихідного отвору. Для теоретичних досліджень параметрів підживлювача скористаємося вихідними даними наведеними в додатку А. За результатами теоретичних досліджень (додаток В) встановлено, що оптимальні режими роботи досягаються при зміні площі вихідного вікна в межах 100–600 мм<sup>2</sup> та частоті обертання шнека 40–70 об/хв. Графічна інтерпретація результатів досліджень наведена на рисунку 2.4.

Графік демонструє, що подача шнекового дозатора зростає нелінійно зі збільшенням діаметра вихідного отвору, причому вплив цього параметра виявляється значно сильнішим, ніж вплив частоти обертання шнека. На малих значеннях діаметра подача змінюється незначно, однак після досягнення приблизно 0,02–0,03 м спостерігається різкий приріст продуктивності, що пояснюється квадратичною залежністю площі перерізу від діаметра.



1-20 об/мин; 2- 40 об/мин; 3- 60 об/мин; 4- 80 об/мин; 5- 100 об/мин

Рисунок 2.4 – Залежність подачі туків від експлуатаційних та конструктивних параметрів

Підвищення частоти обертання також збільшує подачу, однак роль цього параметра стає істотною лише при достатньо великому перерізі вихідного отвору. Таким чином, для точного регулювання подачі доцільно використовувати частоту обертання шнека, тоді як зміна діаметра вихідного вікна є ефективним засобом грубого коригування режиму роботи дозатора. Графічна залежність підтверджує, що оптимальний і стабільний режим роботи дозуючого пристрою досягається при помірних швидкостях обертання та діаметрі отвору в межах, які забезпечують рівномірне переміщення тук без утворення пробок.

Таким чином, дослідження параметрів дозатора підтвердило можливість формування широкого діапазону регулювання подачі, що є важливою умовою точного внесення мінеральних добрив у сучасних системах підживлення.

Сошник із розсіювачем виконує функцію локальної подачі добрив на глибину 5–12 см. Конструкція включає напрямну трубку, лійку, розсіювач та захисний кожух. Форма розсіювача забезпечує формування рівномірної смуги внесення добрив.

#### 2.4 Теоретичні дослідження параметрів культиваторної лапи-сошника для розподілу туків по ширині рядка

Ефективність підґрунтового-розкидного внесення твердих мінеральних добрив (туків) значною мірою визначається параметрами та роботою лапи-сошника (рис. 2.5), яка відповідає за формування траєкторії переміщення тук у товщі ґрунту. Одним із ключових конструктивних елементів такого сошника є голчастий розсіювач 5, виконаний у вигляді вільно обертового обода 6 з різноспрямованими голками 7. Саме взаємодія туків із голками визначає ширину їхнього розподілу в межах наприклад картопляного гребеня та однорідність створюваної зони підживлення.

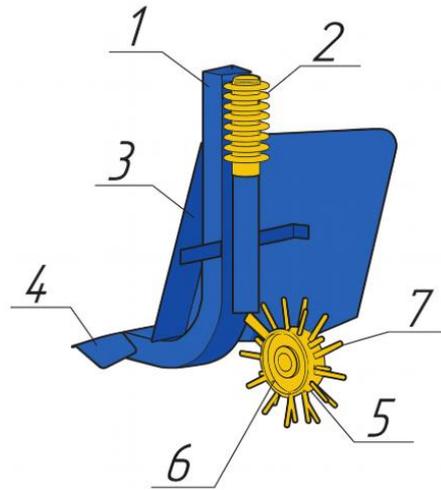


Рисунок 2.5 – Лапа-сошник культиватора підживлювача

Лапа-сошник 4 надійно закріплена на стійці 1, на якій закріплено вертикальний направник 2 тукопровода, наральник 3 та розсіювач 5. При заглибленні лапи-сошника в ґрунті утворюється об’ємна порожнина, в яку подаються туки. Далі вони потрапляють на голки розсіювача, що обертається внаслідок контакту з дном борозни. У процесі руху агрегату обертання розсіювача забезпечує переміщення частинок добрив у бокові горизонти гребеня, що покращує рівномірність їхнього внесення. Виконаємо теоретичні дослідження розглянутих процесів [24-27]

*Кінематичні параметри роботи розсіювача.* Лінійна швидкість руху різноспрямованих голок визначається швидкістю агрегату та радіусом занурення [24]:

$$V_{сп} = \frac{v}{r_{сп}} \cdot r_z, \quad (2.5)$$

де  $V_{сп}$  – значення швидкості різноспрямованих голок, м/с;

$v$  – значення швидкості руху агрегату, м/с;

$r_{сп}$  – середній радіус заглиблення розсіювача, м;

$r_z$  – радіус голки, м.

### *Швидкість тук при виході з тукопроводу*

Туки, що потрапляють із тукопроводу на розсіювач, рухаються за законом вільного падіння. Їхня швидкість на момент контакту із голками визначається виразом:

$$V_{\text{тук}} = \sqrt{2hg}, \quad (2.6)$$

де  $h$  – значення висоти падіння туків, м;

$g$  – постійна  $g = 9,81$ , м/с<sup>2</sup>.

*Ударна взаємодія туки із голкою розсіювача.* На рисунку 2.6 подано розрахункову схему визначення ударного контакту туки з голкою розсіювача.

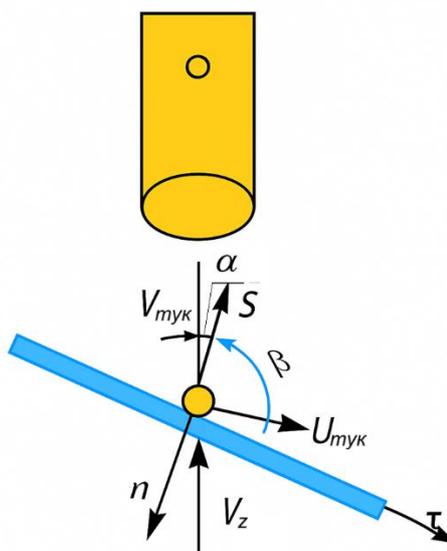


Рисунок 2.6 – Розрахункова схема взаємодії тук з голчастим розсіювачем

Повна швидкість туки при взаємодії з голчастим розсіювачем:

$$V_1 = V_{\text{тук}} + V_z, \quad (2.7)$$

де  $V_z$  – швидкість голки, м/с;

$V_{\text{тук}}$  – швидкість туки, м/с.

Проекції швидкості туки на природні координати нормалі та дотичної подано виразами:

$$\begin{cases} V_{1n} = V_1 \cos \alpha \\ V_{1t} = V_1 \sin \alpha \end{cases} \quad (2.8)$$

де  $\alpha$  – кут зустрічі туки з голкою.

Ударний імпульс уздовж нормалі записується як:

$$mU_{1n} - mV_{1n} = Sy\omega, \quad (2.9)$$

де  $U_{1n}$  – нормальна складова швидкості туки після удару, м/с;

$m$  – маса туки, кг.

Проекція на дотичний напрям:

$$mU_{1t} - mV_{1t} = 0, \quad (2.10)$$

звідки:

$$U_{1t} = V_{1t}. \quad (2.11)$$

Тоді:

$$U_{1t} = V_1 \sin \alpha. \quad (2.12)$$

*Відновлення швидкості після удару.* Процес удару має дві фази:

1. деформація туки;
2. часткове відновлення форми.

Відповідно нормальна складова після удару визначається за коефіцієнтом відновлення:

$$U_{1n} = -kV_{1n}, \quad (2.13)$$

де  $k$  – коефіцієнт відновлення.

Підставивши рівняння 2.8, отримаємо:

$$U_{1n} = -kV_1 \cos \alpha. \quad (2.14)$$

Кут відскоку туки  $\beta$  визначимо за рівнянням:

$$\tan \beta = \frac{|U_{1n}|}{|V_{1t}|}. \quad (2.15)$$

Підставляючи рівняння 2.12 та 2.14, рівняння отримає вигляд:

$$\tan \beta = \frac{\tan \alpha}{k}. \quad (2.16)$$

Повна швидкість після удару:

$$U_1 = \frac{U_{1n}}{\cos \beta}. \quad (2.17)$$

Підставляючи 2.14 отримаємо вираз:

$$U_1 = \frac{-kV_1 \cos \alpha}{\cos \beta}. \quad (2.18)$$

Інтегрування рівнянь руху

Перше рівняння:

$$dU_x = 0. \quad (2.19)$$

Після інтегрування:

$$U_x = C_1. \quad (2.20)$$

де  $C_1$  – постійна інтегрування

Початкова умова:

$$U_{x0} = U_1 \cos \gamma$$

Тоді:

$$C_1 = U_1 \cos \gamma. \quad (2.21)$$

Отже:

$$U_x = U_1 \cos \gamma. \quad (2.22)$$

Інтегруючи:

$$x = U_1 t \cos \gamma + C_2. \quad (2.23)$$

де  $C_2$  – постійна інтегрування.

При  $t = 0, x_0 = 0$

$$C_2 = x_0. \quad (2.24)$$

Остаточно:

$$x = U_1 t \cos \gamma + x_0. \quad (2.25)$$

Друге рівняння:

$$dU_y = g dt. \quad (2.26)$$

Після інтегрування:

$$U_y = gt + C_3. \quad (2.27)$$

Початкова умова:

$$U_{y0} = U_1 \sin \gamma.$$

Звідси:

$$U_y = gt + U_1 \sin \gamma. \quad (2.28)$$

Розв'яжемо:

$$\frac{dy}{dt} = gt + U_1 \sin \gamma. \quad (2.29)$$

Інтегруючи:

$$y = \frac{gt^2}{2} + U_1 t \sin \gamma + C_4 \quad (2.30)$$

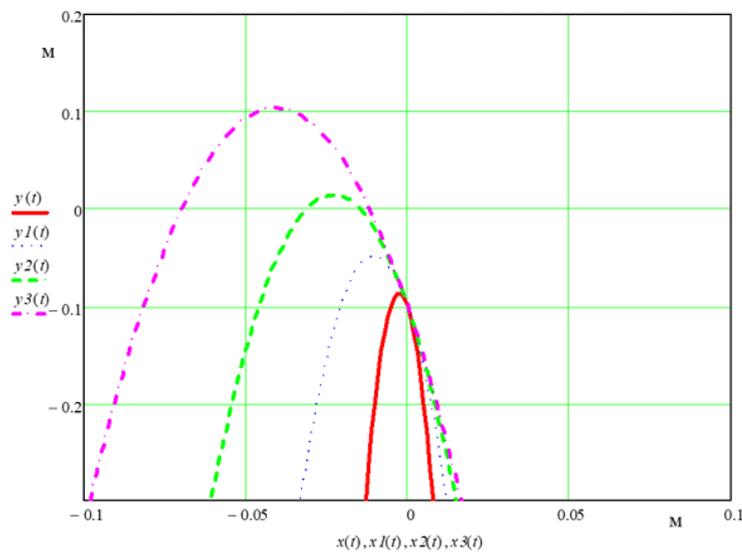
При  $t = 0, y = y_0$ ,

$$C_4 = y_0. \quad (2.31)$$

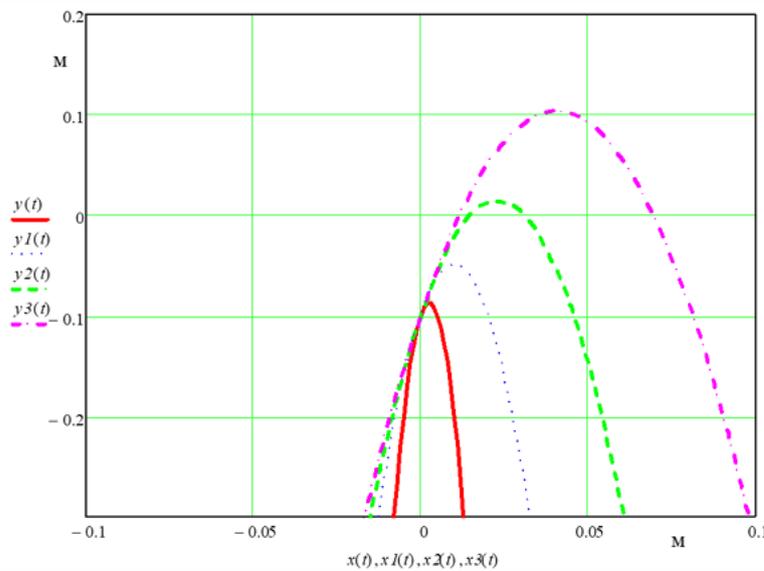
Отже кінцевий вираз:

$$y = \frac{gt^2}{2} + U_1 t \sin \gamma + y_0. \quad (2.32)$$

За результатами отриманих математичних моделей 2.25 і 2.32 виконано теоретичні дослідження (додаток Г) та побудовано графічні залежності (рис. 2.7).



а)



б)

Рисунок 2.7 – Теоретичне дослідження траєкторії руху туки ліворуч (а) та праворуч (б) відносно борозни

Результати математичного моделювання доводять, що застосування розсіювача з різноспрямованими голками забезпечує рівномірне переміщення тук у поперечному напрямку. При цьому важливими робочими параметрами виступають початкова швидкість тук, кут нахилу голок та висота їх встановлення. Моделювання дозволило визначити раціональні параметри: початкова швидкість 1,5...3,5 м/с, кут нахилу 5–6°, висота удару 0,15 м. Отримані результати підтверджують можливість формування рівномірної зони внесення добрив у межах картопляного гребеня.

## 2.5 Висновки

Теоретичні дослідження показали, що ефективність роботи культиватора-підживлювача визначається взаємодією шнекового дозатора, лапи-сошника та голчастого розсіювача. Подача шнекового дозатора залежить передусім від діаметра вихідного отвору та частоти обертання шнека; оптимальний діапазон роботи встановлено при площі вікна 100–600 мм<sup>2</sup> та частоті 40–70 об/хв, що забезпечує стабільну й рівномірну подачу туків. Дослідження динаміки руху тук у сошнику підтвердили, що ширина їхнього рознесення формується параметрами ударної взаємодії з голками. Моделювання визначило раціональні параметри: початкова швидкість тук 1,5...3,5 м/с, кут нахилу різноспрямованих голок 5–6°, висота падіння зіткнення 0,15 м. За цих значень забезпечується рівномірний боковий розподіл частинок і формування стабільної зони живлення культур у межах рядка. Отримані результати підтверджують ефективність технічних рішень та можуть бути використані для оптимізації конструкції дослідного зразка.

## 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 3.1 Програма та мета експериментальних досліджень

У попередньому розділі були виконані теоретичні дослідження роботи дозувального механізму та сошника, що дали змогу визначити діапазони раціональних параметрів для забезпечення стабільної та рівномірної подачі твердих мінеральних добрив у зону ґрунту. Проте будь-яка теоретична модель відображає лише математичну інтерпретацію процесів, а тому потребує підтвердження у реальних умовах експлуатації. З огляду на це була сформована комплексна програма експериментальних досліджень, спрямована на перевірку ефективності роботи дозатора, оцінювання точності локального внесення добрив та визначення можливостей удосконаленої конструкції культиватора-підживлювача.

Експериментальна програма передбачала польові випробування. Такий підхід дає змогу послідовно – від лабораторного досліджень окремих процесів перейти до реальних умов роботи агрегату у полі – встановити закономірності зміни подачі добрив і характер їхнього переміщення у ґрунті. Дослідження виконуємо за загально-прийнятими методиками [28, 29].

Польові дослідження мають на меті підтвердження працездатності дозатора та сошника-розсіювача безпосередньо під час руху агрегату по ґрунту. На цьому етапі оцінимо не тільки технічні характеристики обладнання, а й агрономічні параметри локального внесення добрив: глибину закладення, ширину зони розподілу та рівномірність розміщення гранул у гребені.

Задачі польових випробування:

1. Оцінка впливу різних норм внесення на роботу дозатора та на стан ґрунту.
2. Визначення точності дозування під час руху культиватора.
3. Дослідження просторової рівномірності внесення добрив у гребінь.

#### 4. Оцінка роботи модулів автоматизованого керування.

Оскільки конструкція культиватора передбачає інтеграцію з системами автоматизованого дозування, машину випробували також у режимах змінної норми внесення (VRA), реагування на зміну швидкості та відхилення від траєкторії.

Таким чином, польові дослідження дозволяють оцінити ефективність розроблених конструктивних рішень, виявити їхню поведінку у реальних умовах та провести корекцію параметрів для підвищення точності дозування.

### 3.2 Експериментальний зразок культиватора-підживлювача

Експериментальним об'єктом дослідження є секційний культиватор-підживлювач (рис. 3.1), конструкцію якого спеціально адаптовано для лабораторних та польових випробувань. Основною особливістю машини є модульна побудова, що забезпечує можливість використання агрегату як у складі традиційного тракторного агрегування, так і в системах мостового землеробства. Завдяки секційній структурі кожна робоча секція може функціонувати автономно, що дає змогу встановлювати одну або кілька секцій на раму агромоста для точного внесення добрив у міжряддя з мінімальним ущільненням ґрунту.

У базовій конфігурації експериментальний зразок включає чотири робочі секції, кожна з яких обладнана індивідуальним бункером для твердих мінеральних добрив, шнековим дозатором та сошником із розсіювачем. Таке компонування дозволяє досліджувати як загальний процес дозування та розподілу добрив, так і роботу окремої секції при зміні параметрів подачі, що суттєво розширює можливості експериментальної програми.

Рама культиватора має підсилену конструкцію коробчастого типу, що забезпечує достатню жорсткість під час роботи на полі та при встановленні обладнання вимірювального комплексу. Для забезпечення гнучкого

агрегування передбачено два варіанти з'єднання: триточкова навіска для роботи з колісними тракторами та вузол кріплення до ферми мостової машини. Завдяки цьому експериментальний зразок дозволяє вивчати поведінку дозуючого обладнання в обох принципово різних умовах експлуатації.



Рисунок 3.1 – Експериментальна установка культиватора-підживлювача

Для подачі твердих добрив застосовано шнекові дозатори регульованого типу, параметри яких відповідають діапазону, визначеному у теоретичних дослідженнях. Конструкція дозатора дозволяє змінювати площу вихідного отвору, частоту обертання шнека та ступінь заповнення робочої камери, що робить його придатним для проведення широкого спектра лабораторних експериментів. Усі секції оснащені індивідуальними тукопроводами та робочими лапами з розсіювачами, конструкція яких забезпечує підґрунтово-розкидне внесення добрив.

Окрему увагу приділено системі внесення рідких добрив, яка включає пластикову ємність, насос-дозатор та магістралі подачі розчинів до форсунок. Інтеграція цієї системи дає змогу виконувати комбіноване внесення – тверді та рідкі препарати одночасно або окремо, що підвищує універсальність

культиватора-підживлювача в сучасних технологіях вирощування просапних та овочевих культур.

Технічні та геометричні параметри секційного культиватора-підживлювача, що використаний у цьому дослідженні, наведені у таблиці 3.1, на яку далі здійснюється посилання при описі методики лабораторних і польових випробувань. Вони включають основні розміри, характеристики робочих органів, параметри дозаторів та експлуатаційні показники, що визначають ефективність роботи машини.

Таблиця 3.1 – Технічна характеристика культиватора

Показник	Значення
Габаритні розміри культиватора-підживлювача	
Висота, мм	1350
Довжина, мм	1850
Ширина, мм	3490
Конструктивні параметри	
Кількість секцій	до 4
Ширина міжрядь, мм	300-1200
Ширина лапи-сошника, мм	260
Ширина загортача, мм	300
Об'єм бункера, м <sup>3</sup>	до 0,15
Кількість резервуарів для рідких добрив, шт	до 2
Місткість резервуара для рідких добрив, м <sup>3</sup>	до 0,3
Діаметр розсіювача, мм	220
Технологічні параметри	
Напруга живлення мехатронної системи, В	12
Тиск в системі подачі рідких добрив, МПа	0,2-0,3
Робоча швидкість руху, км/год	7–11
Продуктивність, га/год	2,3–3,5

### 3.3 Експериментальні дослідження лапи-сошника з розсіювачем

Експериментальні дослідження лапи-сошника з розсіювачем були спрямовані на визначення рівномірності поперечного розподілу гранульованих мінеральних добрив у зоні їхнього контакту з ґрунтом. Метою методики було встановлення впливу конструктивних параметрів голчастого розсіювача – зокрема кута нахилу голок, їх кількості та висоти взаємодії з потоком гранул (тук) – на нерівномірність внесення добрив по ширині оброблюваної смуги.

*Методика експериментів.* Для виконання серії експериментів була підготовлена спеціальна вимірювальна поверхня (рис. 3.2), що складалася з листа клейкого паперу розміром 600×2500 мм. Така поверхня слугувала імітацією ґрунтової площини, на якій осідали туки добрив після їхнього проходження через робочу частину лапи-сошника з розсіювачем. Сошник встановлювався на регульовану металеву раму, що дозволяла:

- змінювати висоту положення розсіювача над поверхнею від 90 до 180 мм;
- кут взаємодії гранул із голками ( $4...10^\circ$ );
- точне позиціонування відносно центра площі вимірювання.



Рисунок 3.2 - Експериментальні дослідження лапи-сошника з розсіювачем

Подавання гранул здійснювалося з одного з живильних бункерів. Для забезпечення однакової норми внесення в усіх варіантах дослідів встановлювалася стала частота обертання шнека. Кожен варіант дослідів супроводжувався фотофіксацією за допомогою цифрової камери високої роздільної здатності, розташованої строго перпендикулярно площині клейкого листа.

Для досліджень виготовлено дев'ять модифікацій голчастих розсіювачів (рис. 3.3), що відрізнялися конструктивними параметрами:

1. кут нахилу голок:  $4^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $10^\circ$ ;
2. висота робочих голок: 90, 135, 180 мм;
3. діаметр диска та кількість голок: 11–18 шт.



Рисунок 3.3 – Модифікації голчастих розсіювачів

Таке поєднання дозволило охопити весь діапазон можливих режимів взаємодії гранул (туків) із робочими елементами та оцінити ефективність кожної конструкційної схеми.

План проведення експерименту

Для кожної модифікації виконувалася серія з п'яти повторних дослідів. Послідовність виконання одного дослідів була такою:

1. На столі закріплювався новий чистий клейкий лист.

2. Сошник-розсіювач встановлювали на задану висоту (наприклад, 150 мм).
3. Вмикався шнековий дозатор для подачі туків упродовж фіксованого часу – 4 секунди.
4. Після зупинки подачі виконувалася фотофіксація результату.
5. Дані фото переносилися в комп'ютерну програму для аналізу кількості гранул у визначених зонах.

Кожне фото умовно ділили на 12 елементарних ділянок шириною 50 мм, у межах яких визначали кількість осілих гранул.

Математична обробка результатів

Для кожного варіанта дослідів визначали три показники:

1. Середню кількість гранул на ділянці

$$N_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n N_{3,i}}{n}, \quad (3.1)$$

де  $N_{3,i}$  – кількість туків на  $i$ -тій елементарній ділянці, шт;

$n$  – число ділянок ( $n = 12$ ).

2. Стандартне відхилення

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_{3,i} - N_{\text{ср}})^2}{n-1}}, \quad (3.2)$$

3. Нерівномірність поперечного розподілу

$$H_y = \frac{\sigma}{N_{\text{ср}}} \cdot 100$$

Показник  $H_y$  застосовувався як основний критерій рівномірності роботи розсіювача. Чим менше його значення, тим краща рівномірність внесення гранул.

За результатами обробки кожної серії дослідів (додаток Д) отримали поверхню відгуку нерівномірності розподілу туків в залежності від висоти голок та кута їх нахилу.

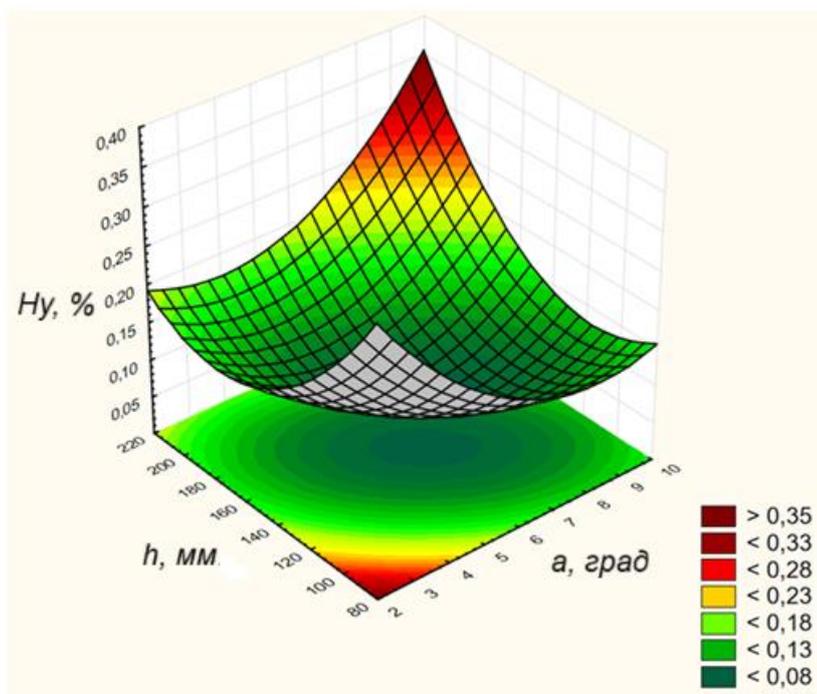


Рисунок 3.4 – Поверхня відгуку нерівномірності розподілення туків

Експериментальні дані показали, що найсуттєвіший вплив на рівномірність розподілу гранул мали два параметри:

1. Кут нахилу голок.
2. Зі збільшенням кута понад  $7^\circ$  відхилення гранул у бокових напрямках різко зростало, що спричиняло підвищення нерівномірності на 25–40%. При кутах  $5\text{--}7^\circ$  спостерігалася найбільш стабільна траєкторія руху гранул та мінімальні значення  $N_u$ .
3. Висота взаємодії голок із потоком.
4. Найкращі результати були отримані при висоті 150 мм. Збільшення висоти до 200 мм призводило до надмірного розсіювання, натомість занадто мала висота (100 мм) не забезпечувала достатнього контакту із гранулами.

У середньому для оптимальних комбінацій параметрів (кут 5–7°, висота 150 мм) нерівномірність розподілу становила 7–11%, що відповідає агротехнічним вимогам до підґрунтового внесення мінеральних добрив.

#### *Регресійний аналіз*

На основі зібраних експериментальних даних була побудована математична модель залежності нерівномірності розподілу  $N_u$  від кута нахилу  $\alpha$  та висоти голки  $h$ :

$$N_u = 1,0141 - 0,1121\alpha - 0,0081h + 0,0052\alpha^2 + 0,0003\alpha h + 2,118 \cdot 10^{-5}h^2$$

Модель має високий коефіцієнт детермінації  $R^2=0,92$ , що свідчить про достатню адекватність опису процесу.

### 3.4 Експериментальні дослідження локального внесення добрив в польових умовах

Польові випробування були проведені з метою оцінювання ефективності локального внесення твердих мінеральних добрив та рідких біопрепаратів за допомогою розробленого культиватора-підживлювача секційного типу. Польові експерименти дали змогу перевірити роботу агрегату у реальних агротехнологічних умовах, враховуючи ґрунтово-кліматичні особливості, швидкість руху, неоднорідність ґрунту та технологію догляду за культурою.

Дослідження виконувалися на вирощуванні картоплі на площі 40 га. Для аналізу ефективності було сформовано три технологічні варіанти:

1. традиційна технологія господарства (контроль);
2. локальне внесення мінеральних добрив за допомогою культиватора-підживлювача;
3. локальне внесення мінеральних добрив у поєднанні з рідким гуматом калію.

### Підготовчі роботи та технологічна схема досліду

Осіньна обробка полів включала основний обробіток ґрунту плугом на глибину 25–27 см, після чого проводилася передпосівна культивуація. На ділянках, де проводили локальне внесення добрив (варіанти 2 і 3), після формування гребенів встановлювався культиватор-підживлювач.

Під час роботи агрегату добрива подавалися у ґрунт лапою-сошником, а рідкі біопрепарати – через форсунки системи дозування прикріплені до стійок лап-сошників. Норма внесення для дослідів становила:

- варіант 2 – 240 кг/га калій-хлор,
- варіант 3 – 240 кг/га калій-хлор + 240 л/га робочого розчину гумату калію концентрацією 0,07 %.

Після налаштування агрегату трактор проходив дослідну ділянку довжиною 100 м, забезпечуючи стабільні умови внесення добрив.



Рисунок 3.5 – Дослідження роботи культиватора-підживлювача в польових умовах

Далі проводився контроль рівномірності роботи системи, зокрема перевірка:

- глибини закладання гранул у гребінь;
- стабільності дозування при русі;
- відстані між потоками гранул у межах рядка;

- рівномірності розподілу рідких біопрепаратів.

У визначених точках відбирали проби ґрунту та виконували заміри кількості гранул на різних глибинах гребеня.

Догляд за культурою та облік урожайності

Усі варіанти досліду супроводжувалися однаковою системою догляду за рослинами.

На початку збирання врожаю з кожного варіанта відбирали по 10 рослин на трьох різних ділянках. Для кожного куща визначали кількість бульб, масу, довжину, ширину і товщину. Отримані дані заносили в таблиці.

Загальна врожайність реєструвалася методом суцільного збирання з наступною переробкою результатів у програмному середовищі Excel.

Особливу увагу приділяли порівнянню традиційної технології та роботи нашого культиватора-підживлювача. Локальне внесення, згідно з отриманими результатами, забезпечило кращий розвиток кореневої системи, рівномірний ріст рослин і підвищення врожайності у порівнянні з контролем. Додавання гумату калію додатково сприяло стійкості рослин до стресу та покращенню засвоєння елементів живлення.

За результатами проведених досліджень отримано графічні залежності врожайності від способу вирощування (рис. 3.6).

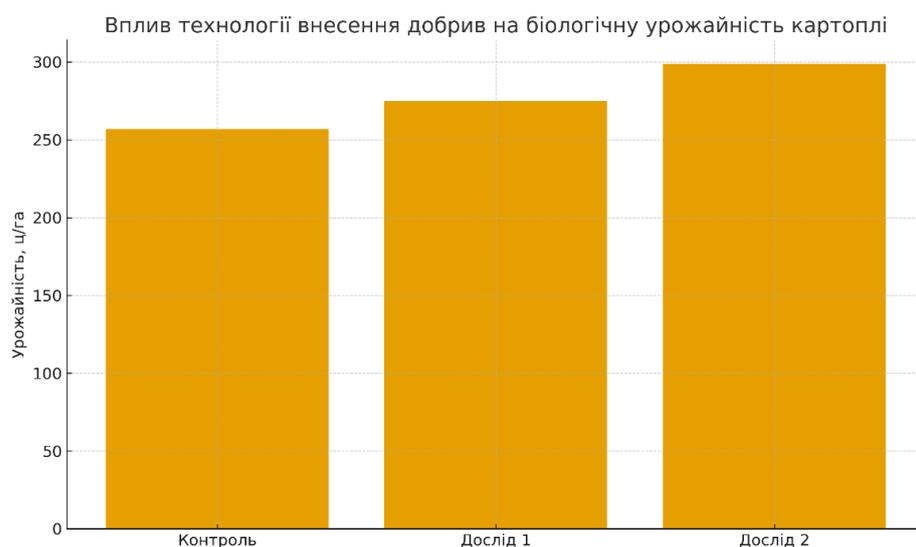


Рисунок 3.6 – Вплив підживлення на урожайність картоплі

Результати польових досліджень підтвердили, що застосування локального внесення добрив під час догляду за картоплею є ефективним методом підвищення продуктивності. Найвищі агробіологічні показники отримано у варіанті, де мінеральні добрива поєднувалися з рідким гуматом калію. Ця технологія сприяла: швидшому росту рослин, формуванню більшої кількості стебел, збільшенню розмірів та маси бульб, підвищенню загальної врожайності майже на 17 %. Отримані дані дозволяють рекомендувати комбіноване локальне внесення добрив як ефективний елемент інтенсивних технологій вирощування картоплі.

### 3.5 Висновки

У розділі виконано експериментальні дослідження роботи дозувального механізму, лапи-сошника та технології локального внесення добрив. Лабораторні експерименти показали, що рівномірність розподілу гранул найбільше залежить від кута нахилу та висоти голок. Оптимальні параметри – 5...7° та близько 150 мм, що забезпечували найменшу нерівномірність та стабільний рух гранул. Розроблена регресійна модель ( $R^2 = 0,92$ ) підтвердила узгодженість експериментальних результатів із теоретичними положеннями.

Польові випробування засвідчили ефективність локального внесення добрив. Використання культиватора-підживлювача підвищило врожайність порівняно з традиційною технологією, а комбіноване внесення мінеральних добрив і гумату калію дало найбільший ефект – до 16–17 % приросту урожаю. Також відзначено збільшення кількості стебел, маси та розміру бульб, що свідчить про покращення умов живлення.

Отримані дані підтверджують, що модернізований культиватор забезпечує точне дозування та рівномірний розподіл добрив, а технологія локального внесення – ефективний інструмент підвищення продуктивності картоплі.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1 Аналіз умов праці та виробничих небезпек під час роботи культиватора-підживлювача у складі трактора

Експлуатація культиватора-підживлювача у складі тракторного агрегату супроводжується впливом комплексу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, притаманних машинним технологіям догляду за просапними та овочевими культурами. З погляду охорони праці культиватор-підживлювач належить до машин підвищеної небезпеки, оскільки його робочі органи взаємодіють із ґрунтом, твердими гранульованими добривами та рідкими препаратами в умовах змінного навантаження і вібраційних режимів.

Робота оператора виконується в кабіні трактора, що частково захищає працівника від шуму, пилу та фізичних впливів. Однак на нього діють такі фактори:

- вібрація і мікровібрація, що передається через сидіння та важелі керування під час руху по нерівному полю;
- шум, що формується двигуном, трансмісією і заднім навісним обладнанням (у середньому 78–85 дБ, що наближається до гранично допустимих рівнів [31]);
- пилоутворення, особливо при роботі на сухому ґрунті і внесенні мінеральних добрив;
- хімічний вплив, пов'язаний із можливим контактом з гранульованими та рідкими препаратами при обслуговуванні дозаторів і заправці бункерів [32].

Важливо відмітити, що внесення твердих і рідких добрив створює додаткові ризики, адже калійні та азотні мінеральні препарати є агресивними для слизових оболонок, шкіри та органів дихання. Тому технологічні операції

завантаження, змішування та промивання системи підпадають під підвищені вимоги до індивідуального захисту.

Небезпечні фактори під час роботи агрегату

Культиватор-підживлювач містить низку механічних вузлів, які за неправильного поводження можуть спричинити травмування персоналу:

1. Рухомі робочі органи – лапи-сошники, диски, голчасті розсіювачі, шнекові дозатори; небезпека зачеплення, порізів і ударів.
2. Привідні механізми – карданні вали, вали відбору потужності, редуктори й ланцюгові передачі, які створюють зони втягування та обертання.
3. Гідравлічна система трактора та навіски, де можливий розрив шлангів або неконтрольований рух секцій при відмові гідравліки.
4. Система подачі рідких добрив – ризик витоку, розбризкування та контакту з агрохімікатами при підвищеному тиску.
5. Пил і гранули добрив, які потрапляють у зону дихання працівника або викликають корозію металевих частин.

За даними НПАОП 0.00-1.28-10, обслуговування та робота з навісними машинами повинні здійснюватися на безпечній відстані від рухомих елементів, із повним припиненням подачі енергії під час огляду або очищення обладнання [33].

*Вплив ґрунтово-кліматичних умов*

Додатковими небезпеками є особливості середовища, де працює агрегат:

- підвищена вологість збільшує ризик прослизання, погіршує гальмування та створює небезпеку заносу;
- робота на схилі підвищує ризик перекидання трактора;
- неоднорідний ґрунт спричиняє ривки агрегату, що збільшує навантаження на оператора і робочі вузли.

Згідно із рекомендаціями ДСТУ EN ISO 12100:2014, під час проєктування машин слід враховувати фактори рельєфу та навантаження, що виникають у реальних умовах експлуатації [35].

Особливості виробничих небезпек секційного культиватора

Секційна конструкція культиватора створює специфічні ризики:

- зміщення секцій при різкому гальмуванні або різкому повороті;
- деформація бункерів при неправильному завантаженні або нерівномірному розподілі добрив;
- підвищене навантаження на кронштейни та вузли кріплення, особливо при роботі з агрономом;
- контакт працівника з робочими органами під час ручного регулювання висоти лап-сошників або напрямку розсіювачів.

Окремого аналізу потребує робота системи голчастого розсіювача. Через високу швидкість проходження гранул у зоні зубців створюється ризик їхнього розлітання назовні, що становить небезпеку для обличчя та очей працівника навіть при короткочасному перебуванні в зоні обслуговування.

Аналіз небезпек під час технічного обслуговування

Операції з обслуговування є найбільш травмонебезпечними:

- очищення шнеків та бункерів від злежаних добрив;
- промивання системи рідких добрив;
- заміна трубопроводів, форсунок, фільтрів;
- регулювання висоти та кута лап-сошників.

Відповідно до НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів», роботи з електричними елементами мехатронної системи (12 В) дозволяється виконувати лише після повного знеструмлення та перевірки відсутності залишкової напруги [33].

Підсумок аналізу небезпек

З урахуванням отриманих даних можна виділити основні групи ризиків:

- механічні – обертальні частини, шнеки, робочі органи;
- електричні – елементи керування, датчики, проводка;
- хімічні – контакт із добривами та препаратами;
- пожежні – розігріті елементи, ПММ, розчини;

- ергономічні – вібрація, статичне навантаження, тривалий час роботи;
- екологічні – можливість потрапляння добрив у навколишнє середовище.

Комплексний аналіз дозволяє сформулювати вимоги до конструктивного захисту, організаційних заходів, технологічної дисципліни та навчання персоналу, які будуть наведені у наступних підпунктах розділу.

#### 4.2 Дії персоналу в аварійних та надзвичайних ситуаціях

Експлуатація тракторного агрегату з культиватором-підживлювачем відбувається в умовах динамічного виробничого середовища, де можливе виникнення аварійних та небезпечних ситуацій як технічного, так і технологічного характеру. Безпечна поведінка персоналу, оперативна реакція на відхилення та правильний порядок дій у надзвичайних умовах є ключовими чинниками мінімізації ризиків травмування та матеріальних втрат. Відповідно до вимог НПАОП 0.00-4.12-05, НАПБ А.01.001-2014 та ДСТУ EN ISO 13849-1, персонал повинен володіти алгоритмами реагування на кожен тип небезпеки.

##### *Загальні принципи реагування*

При виникненні будь-якої позаштатної ситуації першочерговими діями оператора є:

1. Негайне припинення технологічного процесу – вимкнення ВВП, зупинка руху, переведення трактора у режим стоянкового гальма.
2. Вимкнення двигуна та знеструмлення електричної системи культиватора, що запобігає втягуванню сторонніх предметів або продовженню подачі добрив.
3. Оцінка загрози життю та здоров'ю – оператор повинен швидко оцінити, чи є постраждалі, чи існує ризик займання, вибуху або витоку хімічних речовин.
4. Ізоляція небезпечної зони – забороняється підпускати інших працівників ближче ніж на 10 м до агрегату до повного усунення небезпеки.

5. Демонтаж знарядь, що створюють загрозу, або приведення їх у нейтральне безпечне положення.

Оператор повинен зберігати спокій та діяти відповідно до інструкції з охорони праці, а також негайно повідомити керівника робіт про інцидент.

#### *Відмова або поломка механічних вузлів*

До цієї групи належать:

- поломка лапи-сошника,
- заклинювання шнекового дозатора,
- вихід з ладу підшипників,
- руйнування рамної конструкції,
- критичне засмічення робочих органів ґрунтом.

Дії оператора:

1. Зупинити трактор та вимкнути ВВП.
2. Дочекатися повної зупинки рухомих механізмів (шнек, диск, колеса секцій).
3. Не торкатись робочих органів вручну, поки вони не охололи або не були механічно зафіксовані.
4. Оглянути пошкоджену секцію на наявність деформацій.
5. Якщо пошкодження незначне – замінити запобіжний болт, видалити ґрунт, перевірити кріплення.
6. Якщо поломка є критичною – секцію необхідно підняти, заблокувати і продовжити роботу на решті секцій або завершити роботу.

Категорично забороняється очищення сошника або розсіювача без рукавичок та без повного вимкнення тягового агрегату.

#### *Витік рідких добрив або розгерметизація системи*

Розгерметизація може статися через розрив шлангів, помилки під час заправки, пошкодження форсунок або перевищення тиску в системі.

Алгоритм дій:

1. Негайно припинити подачу рідких добрив, перекрити запірний клапан.
2. Зупинити трактор, вимкнути насос-дозатор.
3. Уникати контакту з розчином – гумат та мікробіологічні препарати можуть подразнювати шкіру.
4. Встановити зону обмеження 5–7 м, заборонити перебування сторонніх.
5. Виявити місце розриву: тріщина шланга, дефект хомута, розрив з'єднання.
6. Зібрати розлитий розчин, використовуючи пісок або тирсу.
7. Промити забруднене місце водою та провести нейтралізацію, якщо це передбачено паспортом препарату.

У випадку потрапляння препарату на шкіру працівника необхідно негайно промити місце забруднення водою протягом 10–15 хвилин і звернутись за медичною допомогою.

### *Пожежа або загоряння агрегату*

Основні причини:

- коротке замикання в електромережі;
- перегрів двигуна;
- потрапляння ПММ на гарячі частини двигуна;
- займання сухої рослинності під час роботи.

Алгоритм дій:

1. Зупинити агрегат.
2. Перекрити подачу пального і вимкнути акумулятор.
3. Використати порошковий вогнегасник ВП-2 або ВП-5.
4. Гасити полум'я проти вітру, спрямовуючи струмінь до основи вогню.

5. Не відкривати капот трактора різко, щоб не спричинити доступ кисню і спалах.

6. У випадку масштабної пожежі – відступити на безпечну відстань, викликати ДСНС та повідомити керівника господарства.

Забороняється використовувати воду для гасіння електричних загорянь або займання ПММ.

#### *Аварійні ситуації під час руху агрегату*

До найбільш небезпечних ситуацій належать:

- втрата керованості;
- пробуксовування або бокове ковзання на схилах;
- наїзд на камінь або сторонній предмет;
- розрив навісної системи;
- від'єднання секцій культиватора.

Дії оператора:

1. Зменшити швидкість та перевести трактор на понижену передачу.
2. Уникати різких рухів керма та гальмування.
3. Зупинитись на рівному місці та оглянути причини відхилення.
4. Перевірити стан навісної системи, цілісність пальців, болтів та кронштейнів.

5. У разі відриву секції – позначити місце аварії сигнальною стрічкою, евакуювати обладнання.

#### *Травмування працівника*

При наявності потерпілого оператор зобов'язаний:

1. Негайно зупинити агрегат та вимкнути двигун.
2. Оцінити стан постраждалого – свідомість, дихання, кровотеча.
3. Надати домедичну допомогу:
  - зупинка кровотечі пов'язкою або джгутом,
  - іммобілізація пошкоджених кінцівок,
  - накриття потерпілого для запобігання шоку.

4. Викликати швидку допомогу (103) та повідомити керівництво.
5. Не переміщувати потерпілого, якщо немає загрози для життя (пожежа, розрив гідросистеми тощо).
6. Забезпечити доступ медиків та надати інформацію про інцидент.

#### *Дії персоналу після ліквідації аварії*

Після усунення небезпечної ситуації працівник повинен:

- провести повторний технічний огляд культиватора;
- перевірити герметичність і справність усіх з'єднань;
- зробити запис у *Журналі експлуатації та технічного обслуговування*;
- отримати дозвіл керівника або механіка на подальшу роботу;
- виконати позачерговий інструктаж з охорони праці (за потреби).

#### 4.3 Висновки

Розділ показав, що експлуатація культиватора-підживлювача у складі тракторного агрегату супроводжується низкою виробничих ризиків, пов'язаних із роботою рухомих робочих органів, системою дозування, гідравлікою, електрообладнанням та контактом із добривами. Найважливішими умовами безпеки є дотримання технологічних регламентів, правильне технічне обслуговування та використання засобів індивідуального захисту.

Розроблені заходи охоплюють конструктивні рішення машинного захисту, організаційні правила та інструкції для персоналу. Чіткі алгоритми реагування на аварійні ситуації – зупинка агрегату, знеструмлення, ізоляція небезпечної зони й повідомлення керівництва – мінімізують наслідки можливих відмов. Дотримання цих вимог забезпечує безпечну експлуатацію агрегату та зменшує виробничі ризики під час польових робіт.

## 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ КУЛЬТИВАТОРА-ПІДЖИВЛЮВАЧА

### 5.1 Мета та завдання розрахунку

Метою техніко-економічного обґрунтування є оцінювання доцільності впровадження проєктного секційного культиватора-підживлювача з мехатронною системою дозування твердих і рідких добрив у порівнянні з базовою машиною – культиватором-окучником КОН-2,8. Розрахунок дозволяє визначити економічний ефект від підвищення урожайності, зменшення витрат мінеральних добрив та покращення експлуатаційних показників агрегату.

Основними завданнями розрахунку є:

- встановлення вихідних техніко-економічних параметрів базового та проєктного варіантів;
- визначення додаткового доходу від приросту урожайності при використанні проєктного культиватора;
- оцінка економії витрат на мінеральні добрива за рахунок точного мехатронного дозування;
- узагальнення річного економічного ефекту та розрахунок строку окупності додаткових капітальних вкладень.

### 5.2 Вихідні дані для техніко-економічного розрахунку

Для порівняння прийнято, що обидва варіанти – базовий (КОН-2,8) і проєктний секційний культиватор-підживлювач – працюють у технології вирощування картоплі на одних і тих самих площах та за однакових агротехнічних вимог. Основні вихідні дані для розрахунків зведено до таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для техніко-економічного розрахунку  
культиватора-підживлювача

Показник	Базовий культиватор КОН-2,8	Проектний культиватор
Ціна, грн	198 500	315 000
Площа господарства, га	40	40
Приріст врожайності	–	до 7 %
Урожайність картоплі на контролі, т/га	25	25
Ціна товарної картоплі, грн/т	9 000	9 000
Норма внесення мінеральних добрив, кг/га	240	240
Вартість мінеральних добрив, грн/кг	23	23
Економія добрив завдяки точному дозуванню	–	6 %
Продуктивність агрегату, га/год	2,5	+10 % → 2,75
Витрати ПММ, грн/га	820	720
Вартість обслуговування, грн/рік	12 000	14 000

### 5.3 Методика розрахунку техніко-економічних показників

Розрахунок виконується за класичними залежностями [36], які описують продуктивність агрегатів, витрати матеріальних ресурсів та економічний результат від впровадження удосконаленої машини.

*Змінна продуктивність агрегату, га/год:*

$$W = (B \cdot v \cdot K_{\text{вик}}) / 10. \quad (5.1)$$

де  $B$  – робоча ширина захвату, м;

$v$  – робоча швидкість руху, км/год;

$K_{\text{вик}}$  – коефіцієнт використання часу зміни.

*Витрати мінеральних добрив на 1 га, грн/га:*

$$C_{\text{добр}} = N \cdot C_{\text{добр}}. \quad (5.2)$$

де  $N$  – норма внесення добрив, т/га;

$C_{\text{добр}}$  – ціна 1 т мінеральних добрив, грн/т.

*Вартість добрив у проєктному варіанті з урахуванням зниження норми на  $\Delta N$ , грн/га:*

$$C_{\text{добр.п}} = N \cdot (1 - \Delta N / 100) \cdot C_{\text{добр}}. \quad (5.3)$$

*Економія витрат на добрива на 1 га, грн/га:*

$$\Delta C_{\text{добр.га}} = C_{\text{добр.б}} - C_{\text{добр.п}}. \quad (5.4)$$

де  $C_{\text{добр.б}}$  – витрати на добрива у базовому варіанті, грн/га;

$C_{\text{добр.п}}$  – витрати на добрива у проєктному варіанті, грн/га.

*Додатковий дохід від приросту урожайності на 1 га, грн/га:*

$$\Delta D_{\text{га}} = (Y_{\text{п}} - Y_{\text{б}}) \cdot C_{\text{скарт.}} \quad (5.5)$$

де  $Y_{\text{б}}$  – урожайність при використанні базового культиватора, т/га;

$Y_{\text{п}}$  – урожайність при використанні проєктного культиватора, т/га;

$C_{\text{скарт.}}$  – ціна картоплі, грн/т.

*Сумарний річний економічний ефект від впровадження проєктного культиватора на площі  $S$ , грн/рік:*

$$E_{\text{рік}} = (\Delta D_{\text{га}} + \Delta C_{\text{добр.га}}) \cdot S. \quad (5.6)$$

*Розрахунковий строк окупності додаткових капітальних вкладень, роки:*

$$T = \Delta K / E_{\text{рік}}. \quad (5.7)$$

де  $\Delta K$  – різниця у вартості проєктного та базового культиваторів, грн;

$E_{\text{рік}}$  – річний економічний ефект, грн/рік.

#### 5.4 Результати порівняння базового та проєктного культиваторів-підживлювачів

На основі наведених вихідних даних та формул (5.1)–(5.7) виконано розрахунок економічних показників для базового культиватора КОН-2,8 та проєктного секційного культиватора-підживлювача. Узагальнені результати подано в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Порівняння економічних показників базового та проектного варіантів

Показник	Од,	Варіант		Порівн, +/-
		Базовий	Проектний	
Культиватор		КОН-2,8А	проектний	
Площа	га	40	40	-
Продуктивність, га/год	га/год	2,5	2,75	0,25
Урожайність	т/га	25,7	27,5	1,8
Валова продукція на 1 га	грн/га	205 600	219 992	14 392
Витрати на ПММ	грн/га	820	720	-100
Витрати на добрива на 1 га	грн/га	5520	5188,8	-
Економія на добривах на 40 га	грн/рік	–	13248	13248
Додаткові капітальні вкладення	грн	116 500		
Сумарний річний економічний ефект	грн/рік	330 248		
Розрахунковий строк окупності	роки	0,4		

### 5.5 Висновки

Проведений техніко-економічний аналіз підтвердив доцільність упровадження проектного культиватора-підживлювача. У порівнянні з базовим КОН-2,8 проектний варіант забезпечує зростання продуктивності агрегату, кращу рівномірність внесення добрив та підвищення урожайності картоплі до 7%. Точне дозування дозволило зменшити витрати добрив на 6%, а оптимізована конструкція – скоротити витрати ПММ і підвищити загальну ефективність роботи агрегату. Сукупний річний економічний ефект перевищує 330 тис. грн, що забезпечує окупність додаткових вкладень протягом близько 0,4 року.

## ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У випускній кваліфікаційній роботі вирішено науково-практичне завдання обґрунтування параметрів та розроблення конструкції універсального культиватора-підживлювача, придатного для роботи як у складі традиційних тракторних агрегатів, так і мостових енергетичних засобів точного землеробства.

На основі поставлених вимог за результатами проведеного аналізу машин для внесення добрив розроблено конструктивну схему універсального культиватора-підживлювача з паралелограмною підвіскою секцій, шнековим дозатором твердих добрив, системою подачі рідких препаратів і лапою-сошником із голчастим розсіювачем. Обґрунтовано вибір матеріалів, раціональну компоновку бункерів, тукопроводів і робочих органів, що забезпечує стабільну глибину обробітку, підґрунтово-розкидне внесення добрив та можливість агрегування як з трактором, так і з агромоном.

Розроблено структуру мехатронної системи керування, що дозволяє реалізувати змінну норму внесення (VRA), автоматичне підтримання глибини обробітку та стабільність дозування добрив незалежно від швидкості руху агрегату.

У теоретичній частині одержано залежності, які описують подачу шнекового дозатора залежно від площі вихідного отвору, частоти обертання шнека та фізичних властивостей гранульованих добрив. Встановлено раціональний діапазон роботи дозатора (площа вихідного вікна 100–600 мм<sup>2</sup>, частота обертання 40–70 об/хв), що забезпечує рівномірну подачу туків. Теоретично обґрунтовано раціональні параметри голчастого розсіювача: початкова швидкість 1,5...3,5 м/с, кут нахилу голок 5–6°, висота зіткнення близько 0,15 м.

Експериментальні дослідження лапи-сошника з різними модифікаціями розсіювача підтвердили адекватність теоретичних моделей. Встановлено, що при куті 5–7° та висоті близько 150 мм нерівномірність поперечного розподілу

не перевищує 7–11 %, що відповідає агротехнічним вимогам до підґрунтового внесення мінеральних добрив.

Польові випробування на посівах картоплі показали, що застосування розробленого культиватора-підживлювача забезпечує підвищення врожайності порівняно з традиційною технологією господарства. Приріст урожайності при комбінованому внесенні мінеральних добрив та рідкого гумату калію сягнув до 16–17 %.

У розділі з охорони праці виконано аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів під час роботи культиватора-підживлювача, запропоновано комплекс технічних і організаційних заходів безпеки, а також алгоритми дій персоналу в аварійних та надзвичайних ситуаціях. Це дозволяє забезпечити безпечну експлуатацію агрегату, мінімізувати ризики травматизму та негативний вплив агрохімікатів на працівників і довкілля.

Техніко-економічні розрахунки для площі 40 га показали, що проєктний секційний культиватор-підживлювач порівняно з базовим культиватором КОН-2,8 забезпечує: приріст урожайності картоплі до 7 %; зменшення витрат мінеральних добрив на 6 % завдяки точній роботі дозуючої системи; зниження витрат ПММ за рахунок підвищення продуктивності агрегату на 10 %. Сумарний річний економічний ефект становить понад 330 тис. грн, а розрахунковий строк окупності додаткових капітальних вкладень не перевищує 0,4 року, що свідчить про високу інвестиційну привабливість упровадження розробленої машини.

У цілому результати роботи підтверджують, що запропоновані конструктивно-технологічні рішення культиватора-підживлювача є ефективними, практично реалізованими та відповідають сучасним тенденціям розвитку мехатронних систем і точного землеробства.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1, Ільченко О, М, Енергозберігаючі технології у землеробстві, – Київ: Аграрна наука, 2020, – 256 с,
- 2, Коваль С, В, Агротехнічні вимоги до культиваторів-підживлювачів, // Техніка АПК, – 2021, – № 4, – С, 12–16,
- 3, EOS Data Analytics, Точне землеробство: сучасні технології для підвищення ефективності агробізнесу, – <https://eos.com/uk/blog/tochne-zemlerobstvo>
- 4, Tamirat T, W, Controlled Traffic Farming and Field Traffic Management, – Wageningen University & Research, 2022,
- 5, Chamen, W, C, T, Controlled Traffic Farming – From Worldwide Research to Adoption in Europe and its Future Prospects, – Acta Technologica Agriculturae, 2015,
- 6, Бахмат М, І, Основи охорони ґрунтів, – К,: Центр учбової літератури, 2021,
- 7, Tillett N, D., Hague T., Marchant J, A, Inter-Row Vision Guidance for Mechanical Weed Control in Sugar Beet, – Computers and Electronics in Agriculture, 2002,
- 8, Походження просапного трактора: Farmall Regular/  
<https://www,farmcollector.com/company-history/row-crop-tractor-farmall-regular/>
- 9, Офіційний каталог техніки «Ельворті»: <https://elvorti.com>  
Технічний опис моделі КРН-4,2 ALTAIR, – Ельворті, 2024,
- 10, Офіційний сайт компанії Einböck GmbH: <https://www,einboeck.at>  
Einböck Chopstar Prime Line – технічний опис 2024 р, / Einböck Technologies Catalogue 2024,
- 11, Офіційний сайт Kongskilde Agriculture – <https://www,kongskilde.com/>  
Kongskilde Vibro Crop – Product Catalogue 2024, – Kongskilde Industries A/S, Denmark,

12, Офіційний сайт Garford Farm Machinery – <https://www.garford.com>, Garford Robocrop: Camera Guidance Systems – Product Catalogue 2024, Garford Machinery Ltd,

13, Amazone – «ZA-TS Argus Twin: Automatic adjustment to the optimum lateral distribution», Онлайн-інформація про систему Argus Twin,

14, Експлуатація машин і обладнання: електронний підручник, Тема 3,2 «Приготування та внесення мінеральних і органічних добрив» [Електронний ресурс] / уклад, Іванов Є, В, – Режим доступу: [https://evgivanov.github.io/expl\\_html\\_book/book/part3/tema3-2.html](https://evgivanov.github.io/expl_html_book/book/part3/tema3-2.html)

(дата звернення: 21,09,2025),

15, Петрук Л, Л, Котушково-штифтовий апарат для внесення гранульованих добрив [Електронний ресурс] / Л, Л, Петрук, – Вінниця : ВНАУ, без року, – Режим доступу: <https://socrates.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/21248.pdf> (дата звернення: 21,09,2025),

16, CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Vol, III: Plant Production Engineering, – St, Joseph, MI: ASABE, 1999, – Розд, «Metering Devices», с, 306–308, [Електронний ресурс], Режим доступу: <https://www.project-management-tool.eu/cigr/sites/default/files/documets/CIGRHandbookVol3.pdf>

(дата звернення: 01,10,2025),

17, Мостове землеробство, Елементи теорії та результати досліджень: Монографія [ Кобець А,С,, Теслюк Г,В,, Пугач А,М,, Надикто В,Т,, Улексін В,О, Бойко В,Б,, Теслюк Ю,В,, Золотовська О,В,], – Дніпро: ТОВ «Акцент ПП», 2022, – 340 с,

18. Мехатронні системи автомобілів і тракторів: підручник/ Р.В. Антощенко та ін. Харків. 2020. 219 с.

19. Основи мехатроніки : навч. посіб. / О. М. Артюх та ін. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 372 с.

20. В. Б. Бойко, В.О. Улексін, О.В. Золотовська Є.І. Лепеть, Б.В. Бойко. Проект мехатронної системи експериментальної гідро-пневматичної сівалки. Праці ТДАТУ: Наукове фахове видання . – Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. Вип. 23, т. 2., с. 99-112. ISSN 2220-8674. DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-99-112
21. Журба В. І., Гелетуха Г. Г., Бондаренко В. І. Механіка сипучих матеріалів і процесів їх транспортування. Київ: Аграрна освіта, 2012. 368 с.
22. Біленко М. В. Проектування і розрахунок машин для внесення мінеральних добрив. Київ: НУБіП України, 2015. 224 с.
23. Бондар А. А., Ляшко А. П. Транспортуючі та дозуючі пристрої для сільськогосподарських матеріалів. Київ: Машинобудування, 2009. 312 с.
24. Адамчук В. В. Теорія відцентрових робочих органів машин для внесення мінеральних добрив: монографія. - К.: Аграрна наука, 2012. - 178 с.
25. Ловейкін В. С., Човнюк Ю. В., Дитюк А. І. Модель розсіювання гранул мінеральних добрив після сходження з диска відцентрового розкидача при дії вітру // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – 2012. – Вип. 124, т. 1. – С. 27–35.
26. Філіппов А. І., Ліщик С. Д., Дубень І. В. Дослідження та розробка моделі з оптимізації процесу розкидання добрив // Вісник ВНАУ. Серія: Технічні науки - 2021. - № 1. - С. 108-116.
27. Stajniko D., Berk P., Lakota M. Computer vision–based system for controlling the quality of fertilizer distribution with centrifugal spreaders // Computers and Electronics in Agriculture. – 2012. – Vol. 81. – P. 10–16.
28. Надикто В.Т. Основи наукових досліджень. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС. 2019. 268 с.
29. Білуха, М. Т. Основи наукових досліджень: підручник для студ. економ. спец. вузів / М.Т. Білуха. – К. : Вища школа, 1997. – 479 с.
30. ДСТУ EN 474-1:2014, Машини землерийні, Вимоги щодо безпеки, Частина 1, Загальні вимоги, – К.,: Мінекономрозвитку України, 2015, – 38 с,

31. ДСН 3,3,6,037–99, Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку, – К,: МОЗ України, 1999, – 56 с,
32. НПАОП 0,00-1,76-15, Правила охорони праці під час роботи з хімічними речовинами, – К,: Мінсоцполітики, 2015, – 84 с,
33. НПАОП 0,00-1,28-10, Правила охорони праці під час експлуатації сільськогосподарської техніки, – К,: Мінпраці, 2010, – 112 с,
34. ДСТУ EN ISO 12100:2014, Безпечність машин, Загальні принципи конструювання, – К,: Мінекономрозвитку України, 2015, – 92 с,
35. НПАОП 40,1-1,21-98, Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів, – К,: Мінпаливенерго України, 1998, – 120 с,
36. Черниш С.С.. Економічний аналіз. - К: видавничий центр учбової літератури, 2010. – 313 с.

## *ДОДАТКИ*

## Додаток А

Вихідні дані для проведення теоретичних та експериментальних досліджень  
культиватора-підживлювача

Параметр	Позначення	Значення
Швидкість агрегату	$V$	1,0–1,5 м/с
Середній радіус розсіювача	$r_{cp}$	0,09–0,11 м
Радіус голки	$r_z$	0,12 м
Висота падіння туки	$h$	0,15 м
Коефіцієнт відновлення	$k$	0,4–0,6
Маса туки	$m$	0,002–0,004 кг
Кут зустрічі туки з голкою	$\alpha$	5–12°
Початкова швидкість туки	$V_1$	1,5–3,5 м/с

## Додаток Б

### Результати розрахунків основних параметрів підживлювача

Параметр	Оптимальні/отримані значення
Площа перерізу вихідного отвору дозатора	100–600 мм <sup>2</sup>
Швидкість руху туки у шнеку	0,15–0,45 м/с
Подача дозатора	До 70 кг/год при 70 об/хв
Частота обертання шнека	40–70 об/хв
Радіус заглиблення розсіювача	0,06–0,08 м
Лінійна швидкість голок	0,8–1,6 м/с
Швидкість падіння туки з тукопроводу	1,5–2,0 м/с
Кут зустрічі туки з голкою	20–35°
Швидкість туки після удару	1,5–3,5 м/с
Кут відскоку туки	5–10°
Висота точки удару по голці	0,15 м
Оптимальна початкова швидкість туки	1,5–3,5 м/с
Кут нахилу голок	5–6°

## Додаток В

Результати теоретичних досліджень подачі шнекового дозатора залежно від діаметра вихідного отвору  $D$  та частоти обертання  $n$

$D, \text{ м}$	$\Pi_1$ (20 об/хв), кг/год	$\Pi_2$ (40 об/хв), кг/год	$\Pi_3$ (60 об/хв), кг/год	$\Pi_4$ (80 об/хв), кг/год	$\Pi_5$ (100 об/хв), кг/год
0,005	0,5	1,2	2,0	3,0	4,2
0,010	4,0	7,5	12,0	17,0	23,0
0,015	9,0	16,5	24,0	34,0	45,0
0,020	16,0	28,0	41,0	58,0	75,0
0,025	25,0	44,0	63,0	86,0	110,0
0,030	36,0	62,0	90,0	120,0	150,0
0,035	49,0	85,0	120,0	160,0	200,0
0,040	64,0	110,0	155,0	205,0	260,0
0,045	81,0	140,0	195,0	255,0	320,0
0,050	100,0	170,0	240,0	310,0	390,0

## Додаток Г

### Результати теоретичних досліджень

№	Початковий кут $\gamma$ , °	Максимальне зміщення по X, м	Максимальна висота Y, м	Сторона
1	-70	-0,085...-0,095	0,10...0,12	Ліворуч
2	-60	-0,060...-0,070	0,07...0,09	Ліворуч
3	-50	-0,040...-0,055	0,04...0,06	Ліворуч
4	-40	-0,020...-0,030	0,02...0,03	Ліворуч
5	110	0,020...0,030	0,02...0,03	Праворуч
6	120	0,040...0,060	0,04...0,06	Праворуч
7	130	0,060...0,075	0,07...0,09	Праворуч
8	140	0,085...0,095	0,10...0,12	Праворуч

Додаток Д  
Результати дослідження розподілу туків

Кут нахилу голок, град	Висота голок над поверхнею, мм	Нерівномірність розподілу, % (зона кольору)
2–4	80–120	< 0,13 (зелена)
4–6	120–150	< 0,18 (жовто-зелена)
6–8	150–180	< 0,23 (жовта)
8–10	180–200	< 0,28 (світло- оранжева)
9–10	200–220	> 0,35 (червона)