

Центральноукраїнський національний технічний університет
Агротехнічний факультет
Кафедра сільськогосподарського машинобудування

“Допущено до захисту”

зав. кафедрою СГМ

к.т.н., професор

_____ Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

“ _____ ” _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:

"Удосконалення культиватора міжрядного обробітку
просапних культур з обґрунтуванням параметрів стрілкової лапи"

Виконав здобувач вищої освіти __ІІ__ курсу,
групи ГМ-24М-1

ОНП «Галузеве машинобудування»

спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

_____ Вербицький Богдан Сергійович

« _____ » _____ 2026 р.

Керівник проекту

доцент, канд. техн. наук

_____ 2026 р.

Рецензент

проф., д-р техн. наук

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет агротехнічний

Кафедра сільськогосподарського машинобудування

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

Освітньо-наукова програма «Галузеве машинобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

«__» _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Вербицького Богдана Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи «Удосконалення культиватора міжрядного обробітку просапних культур з обґрунтуванням параметрів стрілчастої лапи»

2. Керівник кваліфікаційної роботи _____

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

3. Строк подання роботи до захисту до 5.05.2026 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності міжрядного обробітку цукрових буряків шляхом удосконалення конструкції стрілчастої лапи та обґрунтування її раціональних геометричних і технологічних параметрів, які забезпечують зниження тягового опору при заданій повноті підрізання бур'янів і мінімальному переміщенні ґрунту в захисну зону рядка.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз технологічного процесу міжрядного обробітку цукрових буряків і встановити основні фактори, що впливають на якість підрізання бур'янів та енергоємність процесу;
- виконати аналіз конструкції стрілчастих лап культиваторів і визначити напрям їх удосконалення для умов міжряддя 45 см;
- отримати аналітичні залежності для визначення тягового опору лапи;
- розробити заходи з охорони праці.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: 1. Аналіз сучасного стану машин згідно теми досліджень. Об'єм – 1 аркуш. 2. Мета, задачі, об'єкт та предмет досліджень. Об'єм – 1 аркуш. 3. Схема машини та вузла, що модернізується. Об'єм – 1 аркуш.

4. Теоретичні дослідження. Об'єм – 1 аркуш. 5. Результати теоретичних досліджень. Об'єм – 1 аркуш.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи
1.	Складання технічного завдання	до 19.01.2026 р.
2.	Техніко-економічне обґрунтування проблеми вдосконалення запропонованої машини	до 20.02.2026 р.
3.	Підготовка та подання керівнику роботи: - стану досліджуваного питання та вибору напряму досліджень; - наукової частини; - практичної реалізації результатів досліджень; - охорони праці; - вступу та загальних висновків.	до 20.02.2026 р. до 01.04.2026 р. до 10.04.2026 р. до 15.04.2026 р. до 20.04.2026 р.
4.	Доопрацювання розділів з урахуванням зауважень	до 24.04.2026 р.
5.	Подання робочого варіанту роботи керівнику для перевірки	до 25.04.2026 р.
6.	Доопрацювання кваліфікаційної роботи з урахуванням зауважень керівника. Отримання відгуку керівника	до 30.04.2026 р.
7.	Передача електронного варіанту пояснювальної записки для перевірки на плагіат	за 10 днів до захисту
8.	Передача пояснювальної записки разом зі звітом перевірки на плагіат (роздрукованої у незшитому вигляді) керівнику на розгляд	після отримання результатів перевірки на плагіат
9.	Подання роботи завідувачу кафедри на перевірку. Отримання направлення на рецензію	за 6 робочих днів до захисту
10.	Рецензування кваліфікаційної роботи. Підготовка документів, що подаються до ЕК	за 3 робочі дні до захисту
11.	Подання роботи всього комплексу документів разом з роботою секретареві ЕК	за 2 робочі дні до захисту
12.	Захист кваліфікаційної роботи	за графіком кафедри

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2026 р.

Підпис керівника _____

_____ (прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2026 р.

Підпис здобувача _____

_____ **Богдан ВЕРБИЦЬКИЙ**

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота присвячена підвищенню ефективності міжрядного обробітку просапних культур шляхом удосконалення конструкції культиватора та обґрунтування раціональних параметрів стрілчастої лапи.

У роботі виконано аналіз існуючих конструкцій міжрядних культиваторів і робочих органів, визначено фактори, що впливають на якість обробітку та енергоємність процесу. Розроблено фізичну модель взаємодії стрілчастої лапи з ґрунтом на основі рівноваги ґрунтового клина та отримано аналітичну залежність для визначення її тягового опору з урахуванням геометричних параметрів і фізико-механічних властивостей ґрунту.

Теоретично обґрунтовано раціональні значення кута різання та кута кришіння, що забезпечують повноту підрізання бур'янів, зменшення бокового переміщення ґрунту в захисну зону рядка та зниження енергоємності процесу.

міжрядний обробіток, культиватор, стрілчаста лапа, кут різання

ABSTRACT

The master's thesis is devoted to improving the efficiency of inter-row cultivation of row crops by upgrading the cultivator design and substantiating the rational parameters of the sweep share.

The work includes an analysis of existing designs of inter-row cultivators and working bodies, and identifies the factors that influence the quality of soil cultivation and the energy consumption of the process. A physical model of the interaction between the sweep share and the soil based on the equilibrium of the soil wedge has been developed, and an analytical relationship for determining its draft resistance has been obtained, taking into account the geometric parameters and the physical and mechanical properties of the soil.

The rational values of the cutting angle and the soil crumbling angle have been theoretically substantiated. These parameters ensure complete weed undercutting, reduce lateral soil displacement into the crop protection zone, and decrease the energy intensity of the process.

inter-row cultivation, cultivator, sweep share, cutting angle

ЗМІСТ

1. ВСТУП	5
2. СТАН ДОСЛІДЖУВАНОГО ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ	7
2.1. Агротехнічні вимоги до міжрядного обробітку просапних культур	7
2.2. Аналіз конструкцій культиваторів для міжрядного обробітку	7
2.3. Огляд наукових досліджень за темою роботи	17
2.4. Обґрунтування напряму досліджень	18
2.5. Висновки по розділу	18
3. НАУКОВА ЧАСТИНА	19
3.1. Побудова моделі взаємодії стрілкової лапи з ґрунтом	19
3.2. Розрахункова схема сил, що діють на стрілкову лапу	19
3.3. Напрямок подальших теоретичних досліджень	21
3.4. Теоретичне визначення тягового опору стрілкової лапи	21
3.5. Нормована залежність тягового опору та вплив кута різання ..	24
3.6. Якісний показник бокового переміщення ґрунту та умова збереження захисної зони рядка	29
3.7. Компромісний критерій вибору параметрів для двох стадій розвитку буряка	32
3.8. Висновки по розділу	37
4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	38
4.1. Вихідні дані для проектування і розрахунку	38
4.2. Обґрунтування конструктивної схеми удосконаленої стрілкової лапи	39
4.3. Вибір та обґрунтування основних параметрів стрілкової лапи	41
4.4. Розрахунок тягового опору удосконаленої стрілкової лапи	43
4.5. Розрахунок навантаження на стійку стрілкової лапи	45
4.6. Перевірочний розрахунок стійки на міцність	46
4.7. Розрахунок тягово-енергетичних показників агрегату УСМК-5,4 з трактором ПМЗ-10280	48
4.8 Висновки до розділу	50
5. ОХОРОНА ПРАЦІ	52
5.1. Аналіз умов праці та аналіз небезпечних та шкідливих факторів, які можуть виникнути при експлуатації міжрядного культиватора	52
5.2. Заходи щодо зниження виробничих ризиків, які можуть виникнути при експлуатації культиватора	52
5.3. Вимоги безпеки під час налагодження та обслуговування	53
5.4. Висновки по розділу	53
6. ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	56
ДОДАТКИ	59

1. ВСТУП

Сучасне рослинництво України орієнтоване на підвищення врожайності просяних культур при одночасному зниженні енергоємності та собівартості технологічних процесів. Однією з ключових операцій у технології їх вирощування є міжрядний обробіток ґрунту, що забезпечує розпушення ґрунтової кірки, знищення бур'янів, покращення аерації та водного режиму. Якість виконання цієї операції значною мірою визначається конструкцією робочих органів культиватора, насамперед стрілочастих лап.

У реальних умовах експлуатації серійні культиватори не завжди забезпечують стабільну глибину обробітку та повне підрізання бур'янів, особливо на ґрунтах із неоднорідною щільністю та підвищеною вологістю. Це призводить до збільшення тягового опору, перевитрати пального, пошкодження культурних рослин і зниження ефективності агротехнічних заходів. Тому актуальним є удосконалення конструкції міжрядного культиватора з обґрунтуванням геометричних і кінематичних параметрів стрілої лапи, що забезпечать зменшення енерговитрат і підвищення якості обробітку.

Аналіз наукових досліджень свідчить, що ефективність роботи стрілочастих лап визначається кутом розкриття крил, кутом атаки, шириною захвату, формою різальної кромки та умовами взаємодії з ґрунтовим середовищем. Недостатня узгодженість цих параметрів із режимами руху агрегату призводить до підвищеного буксування, утворення гребенів і пропусків у зоні міжряддя. Водночас сучасні вимоги до енергоощадних технологій потребують створення робочих органів, здатних працювати на підвищених швидкостях без погіршення агротехнічних показників.

Метою магістерської роботи є підвищення ефективності міжрядного обробітку цукрових буряків культиватором УСМК-5,4 шляхом удосконалення конструкції стрілої лапи та обґрунтування її раціональних геометричних і технологічних параметрів, які забезпечують зниження

тягового опору при заданій повноті підрізання бур'янів і мінімальному переміщенні ґрунту в захисну зону рядка.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз технологічного процесу міжрядного обробітку цукрових буряків і встановити основні фактори, що впливають на якість підрізання бур'янів та енергоємність процесу;
- виконати аналіз конструкції стрілчастих лап культиваторів і визначити напрям їх удосконалення для умов міжряддя 45 см;
- отримати аналітичні залежності для визначення тягового опору лапи;
- оцінити економічну ефективність запропонованих технічних рішень та розробити заходи з охорони праці.

Об'єктом дослідження – технологічний процес міжрядного обробітку просапних культур культиватором із стрілчастими лапами.

Предмет дослідження – залежності між конструктивними параметрами стрілчастої лапи, режимами роботи культиватора та показниками якості й енергоємності обробітку.

Наукова новизна роботи полягає в обґрунтуванні раціональних геометричних параметрів стрілчастої лапи та вдосконаленні конструкції секції культиватора, що забезпечує стабільну глибину обробітку та зменшення тягового опору. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання при модернізації серійних міжрядних культиваторів у господарствах різних форм власності.

Результати досліджень можуть бути використані на машинобудівних підприємствах при проєктуванні нових зразків ґрунтообробної техніки, а також у навчальному процесі під час підготовки фахівців з галузевого машинобудування.

2. СТАН ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Агротехнічні вимоги до міжрядного обробітку просапних культур.

Міжрядний обробіток просапних культур є одним із основних технологічних заходів догляду за посівами, що забезпечує знищення бур'янів, розпушування ґрунту, збереження вологи та покращення повітряного режиму кореневмісного шару. Якість виконання цього процесу значною мірою визначається конструкцією робочих органів культиватора.

До основних агротехнічних вимог належать:

- забезпечення повного підрізання бур'янів;
- дотримання заданої глибини обробітку;
- відсутність пошкодження культурних рослин;
- формування дрібногрудкуватої структури ґрунту;
- мінімальна енергоємність процесу.

Виконання цих вимог значною мірою залежить від геометричних параметрів стрілочастих лап, їх взаємного розташування та режимів роботи.

2.2. Аналіз конструкцій культиваторів для міжрядного обробітку.

Для міжрядного обробітку просапних культур застосовують культиватори типу: КРН, КРНВ, УСМК, сучасні просапні культиватори з паралелограмними підвісками секцій. В Україні культиватори виробляють Завод Проммаш, БілоцерківМАЗ, Уманьферммаш, Хмільниксільмаш, Ельворті Груп тощо.

Їх робочі органи включають: стрілочасті лапи; долотоподібні лапи; плоскорізальні ножі; ротаційні робочі органи. Найбільш поширеними є стрілочасті лапи, які забезпечують суцільне підрізання бур'янів по всій ширині захвату.

Переваги серійних культиваторів – універсальність, простота конструкції, можливість агрегатування з тракторами різних класів, достатня продуктивність.

Недоліки – значне тягове зусилля, нестабільність глибини обробітку, забивання рослинними рештками, недостатня якість підрізання бур'янів при зміні вологості ґрунту.

Як базову машину для подальшого удосконалення прийнято культиватор суцільного міжрядного обробітку УСМК-5,4, який призначений для догляду за посівами просапних культур з міжряддям 45–70 см (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Культиватор для міжрядного обробітку УСМК-5,4

Культиватор агрегатується з тракторами тягового класу 1,4 та забезпечує виконання таких технологічних операцій: розпушування ґрунту в міжряддях, підрізання бур'янів, руйнування ґрунтової кірки; формування мульчувального шару.

Культиватор УСМК-5,4 складається із зварної рами, навісного пристрою, опорно-копіювальних коліс, робочих секцій, паралелограмного механізму підвіски секцій, робочих органів (стрілчастих лап), механізмів регулювання глибини ходу. Кожна секція забезпечує копіювання рельєфу поля та стабільність глибини обробітку.

Переваги конструкції – секційна будова, наявність паралелограмної підвіски, стабільність глибини обробітку, універсальність застосування, простота регулювань.

Недоліки конструкції. У процесі експлуатації виявлено підвищене тягове зусилля при роботі стрічастих лап, нестабільна якість підрізання бур'янів при зміні вологості ґрунту, інтенсивне зношування лез лап, утворення гребенів ґрунту в зоні перекриття, значне переміщення ґрунту в міжряддях. Основним фактором, що обмежує ефективність роботи культиватора, є недосконалість геометричних параметрів стрічастих лап.

Таблиця 2.1

Технічна характеристика культиватора УСМК-5,4

№ п/п	Найменування показників	Значення
1	2	3
1	Ширина захвату, м	5,4
2	Робоча швидкість, км/год	6–10
3	Глибина обробітку, см	6–12
4	Продуктивність, га/год	3,2–5,4
5	Кількість секцій, шт.	8
6	Маса, кг	≈1250

Культиватор КН-3,8-12 виробництва ТОВ НВП «БілоцерківМАЗ» належить до машин для суцільного та передпосівного обробітку ґрунту і може використовуватись під час догляду за парами (рис. 2.2). Його конструктивна схема виконана за традиційною для широкозахватних культиваторів компоновкою з розміщенням робочих органів у два ряди на жорсткій зварній рамі. Таке компонування забезпечує раціональний розподіл навантажень по ширині захвату, зменшення забивання рослинними рештками та підвищення стабільності технологічного процесу.

Робочі органи представлені стрічастими лапами, закріпленими на пружних стійках, що дозволяє частково демпфувати динамічні навантаження під час взаємодії з ґрунтом і перешкодами. Дворядне їх розташування сприяє кращому перекриттю оброблюваних смуг і більш рівномірному

розпушуванню шару ґрунту. Разом з тим така схема збільшує загальну довжину агрегату в поздовжньому напрямку, що впливає на кінематичні параметри руху та енергоємність процесу.



Рисунок 2.2 – Культиватор начіпний КН-3,8-12 виробництва
«БілоцерківМАЗ»

Система регулювання глибини обробітку виконана у вигляді опорних котків, положення яких змінюється гвинтовими механізмами. З конструктивної точки зору це просте і надійне рішення, яке забезпечує стабілізацію глибини ходу лап та одночасно виконує функцію додаткового подрібнення ґрунтових грудок у поверхневому шарі. Однак розміщення котків позаду зони основного обробітку призводить до того, що якість кришіння значною мірою залежить від фізико-механічних властивостей ґрунту та швидкості руху агрегату.

Позаду стрічастих лап встановлена пружинна граблина, яка виконує кілька технологічних функцій: остаточне вирівнювання поверхні поля, додаткове розпушування верхнього шару та вичісування підрізаних бур'янів. Її робота підвищує загальну якість обробітку, проте ефективність значною мірою визначається рівномірністю попереднього розпушування лапами, що свідчить про визначальну роль геометричних і технологічних параметрів саме стрічастих робочих органів.

Запобіжний механізм стійок забезпечує захист робочих органів і елементів рами від перевантажень при зустрічі з перешкодами. Це підвищує експлуатаційну надійність машини, але водночас викликає додаткові вертикальні переміщення лап, що може негативно впливати на рівномірність глибини обробітку.

Аналіз конструкції культиватора КН-3,8-12 показує, що при достатньо ефективній загальній компоновці та надійності основних вузлів вирішальним фактором формування якісних показників технологічного процесу є робота стрілочастих лап. Саме їх геометричні параметри, кут встановлення, характер взаємодії з ґрунтом і енергетичні показники визначають ступінь кришіння та розпушування ґрунту, повноту підрізання бур'янів, тяговий опір агрегату, рівномірність глибини обробітку.

Подібну за технологічним призначенням конструктивну схему має паровий навісний культиватор КПН-4 виробництва ВАТ «Уманьферммаш», який використовується для суцільного обробітку ґрунту (рис. 2.3). Даний культиватор забезпечує виконання комплексу операцій за один прохід агрегату, зокрема розпушування поверхневого шару, мульчування, вирівнювання мікрорельєфу поля та механічне знищення бур'янів. Поєднання цих процесів досягається раціональним компонуванням робочих органів і допоміжних вузлів.

Несучою основою культиваторів є просторова рама, на якій у три ряди встановлено стрілочасті лапи. Таке розміщення забезпечує необхідне перекриття оброблюваних смуг і суцільність підрізання бур'янів по всій ширині захвату. Трирядна схема розташування робочих органів покращує проходження ґрунтового потоку і зменшує забивання рослинними рештками, однак водночас збільшує металомісткість конструкції та її поздовжні габарити, що впливає на енергетичні показники агрегату.

Регулювання глибини обробітку здійснюється зміною положення опорних коліс відносно рами за допомогою гвинтових механізмів. Ця система є конструктивно простою і надійною в експлуатації, але точність

підтримання заданої глибини значною мірою залежить від рівності поверхні поля та технічного стану робочих органів.



Рисунок 2.3 – Культиватор КПН-4 виробництва ПАТ «Уманьферммаш»

Суттєвий розвиток вітчизняних ґрунтообробних машин спостерігається у номенклатурі культиваторів виробництва заводу «Дніпромаш», який випускає широкий спектр машин різного технологічного призначення (рис. 2.4). До них належать важкі культиватори КТ-5 і КТ-8, комбіновані протиерозійні агрегати типу «Дніпропак» КТС-7,2 та КТС-6,4 зі складаною рамою, культиватори для обробітку парів КОП-7,4, комбіновані навісні культиватори КНК-6, причіпні КП-4-1, навісні КПН-4 та протиерозійні КПП-3,9.

Характерною особливістю зазначених машин є застосування секційних або шарнірно-зчленованих рам, що забезпечує значну ширину захвату при збереженні допустимих транспортних габаритів. Компактне складання крил дозволяє відмовитися від використання додаткових зчіпок, що підвищує мобільність агрегатів і скорочує тривалість підготовчих операцій перед початком роботи. Таке конструктивне рішення позитивно впливає на

організаційно-технологічні показники використання машинно-тракторних агрегатів.

У більшості конструкцій робочі органи представлені стрілочастими лапами, що дає змогу ефективно обробляти як традиційні агрофони, так і стерньові фони після збирання зернових культур. Завдяки цьому культиватори можуть використовуватись у системах мінімального та ґрунтозахисного обробітку. Рациональне компонування робочих органів у поєднанні з вирівнювальними та коткувальними пристроями забезпечує виконання кількох технологічних операцій за один прохід.



Рисунок 2.4 - Культиватор КТ-5 «Дніпромаш»

Таким чином, навіть за наявності сучасних конструктивних рішень у компоновці рам, механізмах складання та допоміжних робочих органах подальше підвищення ефективності культиваторів пов'язане передусім з удосконаленням геометричних і технологічних параметрів стрічастих лап, що підтверджує актуальність обраного напрямку досліджень.

Культиватор міжрядного обробітку КРН-5,6 призначений для догляду за посівами просапних культур, висіяних з міжряддям 45 і 60 см, та забезпечує виконання комплексу технологічних операцій, зокрема розпушування ґрунту в міжряддях, знищення бур'янів, руйнування ґрунтової кірки й часткове підгортання рослин. Конструктивна схема культиватора

виконана за секційним принципом, що дає змогу кожному робочому органу копіювати мікрорельєф поверхні поля та підтримувати задану глибину обробітку.

Несучим елементом машини є зварна рама, на якій змонтовано навісний пристрій, опорно-приводні колеса та робочі секції. Секції приєднані до рами за допомогою паралелограмних підвісок, що забезпечує сталість положення робочих органів відносно поверхні ґрунту незалежно від коливань рами під час руху агрегату. Таке конструктивне рішення позитивно впливає на рівномірність глибини обробітку й якість виконання технологічного процесу.

Кожна робоча секція оснащена змінним комплектом робочих органів, до складу якого входять стрілчасті лапи, однобічні плоскорізальні лапи, долотоподібні розпушувачі та підгортальні корпуси. Це забезпечує універсальність використання культиватора на різних фазах розвитку рослин. Робочі органи закріплюються на стійках, що дає змогу регулювати їх положення по висоті та в поперечному напрямку залежно від ширини міжряддя та агротехнічних вимог.

Стабілізація глибини ходу робочих органів здійснюється за допомогою опорно-приводних коліс, положення яких змінюється регулювальними механізмами. Окрім функції копіювання рельєфу, колеса виконують роль опорних елементів приводу туковисівних апаратів і висівних пристроїв для внесення мінеральних добрив (у відповідних модифікаціях культиватора).

Важливою конструктивною особливістю культиватора КРН-5,6 є наявність захисних дисків або щитків, розташованих у зоні рядка культури (рис. 2.5). Вони обмежують переміщення ґрунту в напрямку рослин і забезпечують формування захисної зони, що є необхідною умовою для якісного міжрядного обробітку просапних культур, особливо на ранніх фазах їх розвитку.

Задня частина секцій може комплектуватися вирівнювальними або підгортальними робочими органами, які формують мікрорельєф поверхні

міжряддя та покращують водно-повітряний режим ґрунту. Ефективність їх роботи значною мірою визначається якістю попереднього розпушування, що ще раз підкреслює визначальну роль лап у формуванні технологічних показників процесу.



Рисунок 2.5 – Культиватор міжрядний КРН-5,6 від заводу виробника Avalon

Аналіз конструкції культиватора КРН-5,6 свідчить, що його секційна будова, паралелограмна підвіска та наявність пристроїв для формування захисної зони забезпечують високу адаптивність до умов міжрядного обробітку. Разом з тим основні енергетичні витрати та якість підрізання бур'янів залежать від геометричних параметрів і технічного стану стрічастих лап, які безпосередньо взаємодіють із ґрунтом. Це підтверджує доцільність удосконалення саме робочих органів як головного напрямку підвищення ефективності функціонування культиваторів даного типу.

Культиватор міжрядного обробітку ALTAIR 4,2-0,6 призначений для догляду за просапними культурами з міжряддям 45–70 см і забезпечує розпушування ґрунту в міжряддях, механічне знищення бур'янів, руйнування ґрунтової кірки та формування оптимального водно-повітряного режиму в кореневмісному шарі (рис. 2.6). За своєю конструктивною схемою агрегат

належить до машин секційного типу з індивідуальним копіюванням рельєфу кожною робочою секцією.



Рисунок 2.6 – Культиватор міжрядний ALTAIR 4.2-0,6

Основним несучим елементом є жорстка рама, на якій змонтовано навісний пристрій, опорні колеса та комплект робочих секцій. Секції приєднані до рами за допомогою паралелограмних механізмів підвіски, що забезпечує сталість просторового положення робочих органів відносно поверхні поля та стабільність глибини обробітку незалежно від коливань рами під час руху. Така схема підвіски дозволяє підвищити рівномірність обробітку і зменшити пошкодження культурних рослин.

Кожна секція оснащена опорно-копіювальним колесом, яке виконує функцію точного регулювання глибини ходу робочих органів. Наявність індивідуальних копіювальних елементів забезпечує адаптацію робочих органів до мікрорельєфу поля та сприяє стабілізації технологічного процесу, особливо при роботі на підвищених швидкостях.

Робочі органи культиватора мають змінну комплектацію і включають стрічасті лапи, однобічні плоскорізальні лапи, розпушувальні елементи та підгортальні корпуси. Це дає змогу використовувати агрегат на різних фазах розвитку рослин і виконувати як ранній, так і пізній міжрядний обробіток. Регулювання їх положення в поперечному та вертикальному напрямках забезпечує формування захисної зони рядка відповідно до агротехнічних

вимог. У зоні рядка встановлюються захисні диски або щитки, які обмежують переміщення ґрунту в напрямку рослин і запобігають їх присипанню. Задня частина секції може комплектуватися вирівнювальними або підгортальними робочими органами, що забезпечують формування необхідного мікрорельєфу міжряддя. Конструкція культиватора передбачає можливість швидкого переналагодження на різні ширини міжрядь шляхом перестановки секцій по рамі. Це підвищує універсальність агрегату та коефіцієнт його використання впродовж вегетаційного періоду. Аналіз конструктивної схеми культиватора ALTAIR 4,2-0,6 показує, що застосування паралелограмної підвіски секцій, індивідуальних копіювальних коліс і змінного комплекту робочих органів забезпечує високу адаптивність машини до різних ґрунтово-кліматичних умов і фаз розвитку рослин. Разом з тим основні показники якості міжрядного обробітку — повнота підрізання бур'янів, інтенсивність розпушування ґрунту та величина тягового опору — формуються безпосередньо стрілочастими лапами, геометричні параметри та характер взаємодії яких із ґрунтом визначають енергетичну ефективність агрегату.

2.3. Огляд наукових досліджень за темою роботи

Питаннями обґрунтування параметрів робочих органів культиваторів займалися вітчизняні науковці у галузі ґрунтообробних машин, дослідники енергозбереження технологічних процесів, фахівці з оптимізації геометрії лез робочих органів. У роботах встановлено залежність тягового опору від кута кришіння, вплив ширини захвату лапи на якість обробітку, раціональні значення кутів різання для різних типів ґрунтів.

Разом з тим недостатньо дослідженим залишається питання комплексного обґрунтування параметрів стрілочасті лапи з урахуванням умов міжрядного обробітку, зниження енергоємності процесу при забезпеченні високої якості підрізання бур'янів. Це визначає актуальність подальших досліджень.

2.4. Обґрунтування напряму досліджень.

На основі проведеного аналізу встановлено, що підвищення ефективності міжрядного обробітку можливе за рахунок удосконалення конструкції стрілкової лапи, обґрунтування її геометричних параметрів, зменшення тягового опору, покращення якості підрізання бур'янів.

Як базову конструкцію для подальшого удосконалення прийнято культиватор міжрядного обробітку з секційною будовою та стрілковими лапами УСМК-5,4.

Проведений аналіз конструкції культиватора показав, що його основні техніко-економічні показники значною мірою визначаються параметрами стрілкових лап. Підвищення ефективності роботи культиватора можливе за рахунок зменшення тягового опору робочих органів, покращення якості підрізання бур'янів, стабілізації глибини обробітку, зниження інтенсивності зношування лез.

Досягнення цього можливе шляхом удосконалення конструкції стрілкової лапи, обґрунтування її геометричних параметрів, встановлення раціональних кутів різання та кришіння, оптимізації ширини захвату лапи.

У зв'язку з цим у магістерській роботі прийнято напрям досліджень, який полягає в удосконаленні стрілкової лапи культиватора УСМК-5,4 з теоретичним обґрунтуванням її параметрів.

2.5. Висновки по розділу.

Аналіз конструкції культиватора УСМК-5,4, який прийнято за базовий прототип, показав, що якість виконання технологічного процесу міжрядного обробітку цукрових буряків значною мірою визначається параметрами та технічним станом стрілкових лап шириною 150 мм. При міжрядді 45 см ці робочі органи повинні забезпечувати повне підрізання бур'янів у центральній частині міжряддя, мінімальний викид ґрунту в захисну зону рядка та стабільність глибини обробітку.

3. НАУКОВА ЧАСТИНА

3.1. Побудова моделі взаємодії стрілкової лапи з ґрунтом.

Технологічний процес міжрядного обробітку ґрунту стрілковою лапою супроводжується складною просторовою взаємодією робочого органу з оброблюваним середовищем, що характеризується деформацією, зсувом та переміщенням ґрунтових частинок.

Для теоретичного дослідження процесу прийнято фізичну модель взаємодії лапи з ґрунтом, у якій:

- ґрунт розглядається як суцільне середовище;
- робочий орган рухається з постійною швидкістю;
- глибина обробітку є сталою;
- вплив коливань і вібрацій не враховується.

Прийняті припущення дозволяють отримати аналітичні залежності, які адекватно описують процес взаємодії робочого органу з ґрунтом.

Стрілчаста лапа шириною 150 мм рухається в ґрунті на заданій глибині під кутом до напрямку руху, здійснюючи підрізання бур'янів і розпушування шару ґрунту. У процесі роботи перед лезом формується зона ущільнення, обмежена поверхнями ковзання, по яких відбувається зсув ґрунтового клина.

Таким чином, взаємодію лапи з ґрунтом можна подати у вигляді взаємодії робочої поверхні з ґрунтовим клином, який переміщується по поверхні лапи. Математична модель процесу базується на умові рівноваги ґрунтового клина.

3.2. Розрахункова схема сил, що діють на стрілчасту лапу.

У процесі роботи на стрілчасту лапу діє система сил (рис. 3.1):

- тяговий опір ґрунту R ;
- нормальна реакція ґрунту N ;
- сила тертя ґрунту по робочій поверхні F ;
- вага ґрунтового клина G ;
- реакції з боку стояка культиватора.

На рис. 3.1 показано розрахункову схему взаємодії стрілкової лапи з ґрунтом у вертикальній площині.

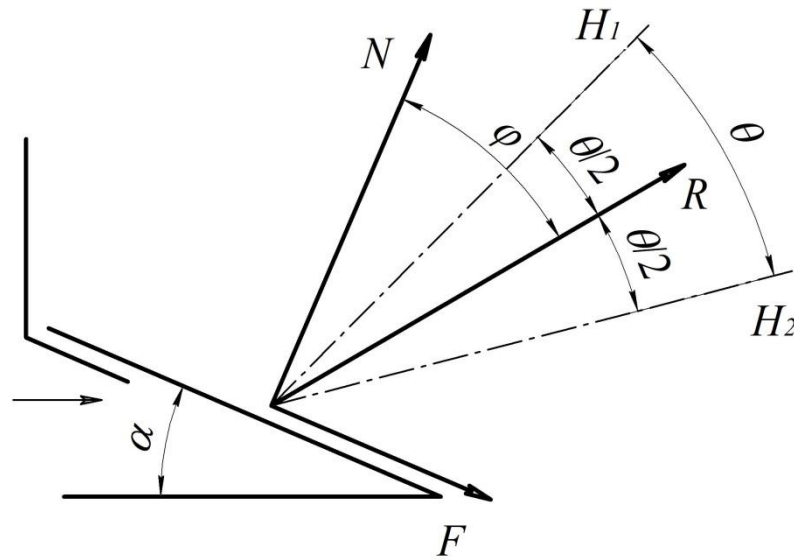


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема взаємодії стрілкової лапи з ґрунтом у вертикальній площині

Тяговий опір є рівнодійною горизонтальних складових усіх сил опору, що виникають у зоні контакту лапи з ґрунтом. Геометричний зв'язок між складовими реакції ґрунту показано на рис. 3.2.

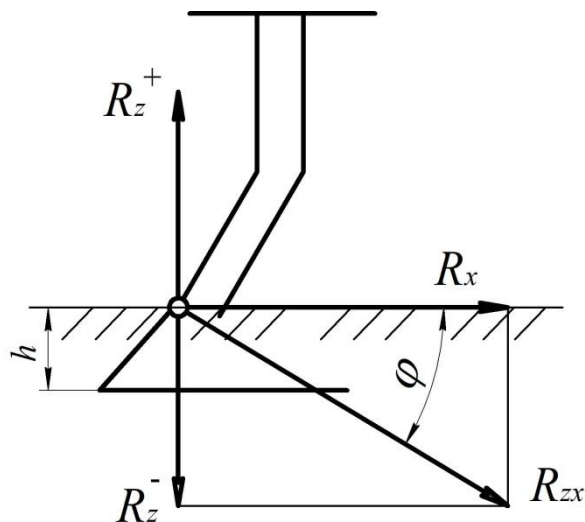


Рисунок 3.2 – Розкладання реакції ґрунту на вертикальну і горизонтальну складові

Нормальна реакція спрямована перпендикулярно до робочої поверхні лапи, а сила тертя – вздовж цієї поверхні та визначається залежністю

$$F = N \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (3.1)$$

де φ – кут тертя ґрунту по сталі.

Рівновага ґрунтового клина описується рівняннями статички, що дозволяє визначити величину тягового опору лапи.

3.3. Напрямок подальших теоретичних досліджень.

Отримана розрахункова схема дає можливість:

- визначити залежність тягового опору від геометричних параметрів лапи;
- встановити вплив кута розкриття крил та кута різання на енергоємність процесу;
- оцінити характер переміщення ґрунту по робочій поверхні.

У подальших дослідженнях передбачається отримати аналітичні залежності для визначення тягового опору та обґрунтувати раціональні параметри стрілкової лапи. Формування тягового опору стрілкової лапи в горизонтальній площині показано на рис. 3.3.

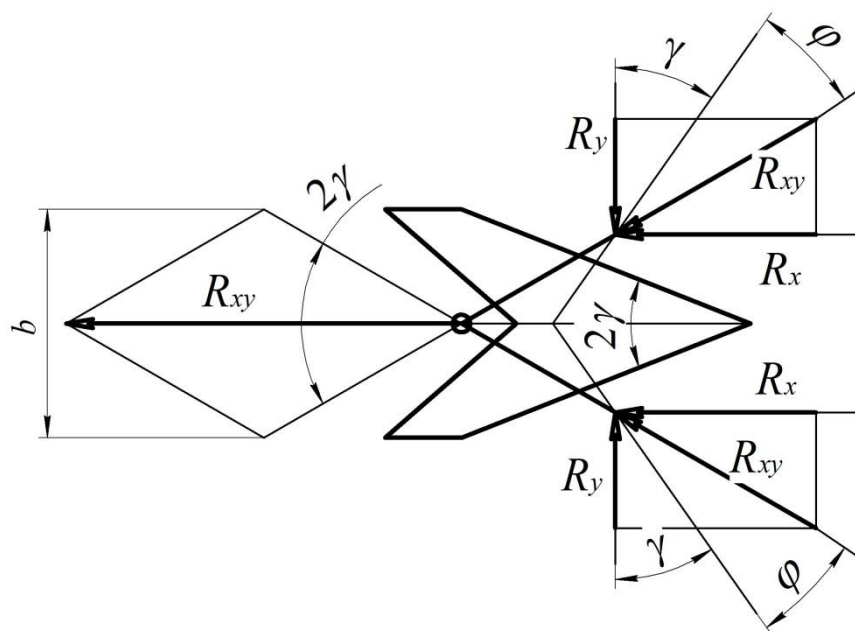


Рисунок 3.3 – Схема дії сил на стрілкову лопу в горизонтальній площині

3.4. Теоретичне визначення тягового опору стрілкової лапи.

Тяговий опір стрілкової лапи формується внаслідок складного процесу її взаємодії з ґрунтом, що супроводжується різанням, деформацією, зсувом і

переміщенням ґрунтового шару по робочій поверхні. Величина опору залежить від фізико-механічних властивостей ґрунту, геометричних параметрів робочого органу та режиму роботи.

Для отримання аналітичної залежності приймемо розрахункову схему, відповідно до якої перед робочою поверхнею лапи утворюється ґрунтовий клин, обмежений площинами ковзання, по яких відбувається зсув деформованого шару.

Позначимо:

b – конструктивна ширина захвату лапи, м;

h – глибина обробітку, м;

α – кут різання лапи;

γ – кут кришіння;

φ – кут внутрішнього тертя ґрунту;

δ – кут тертя ґрунту по сталі.

Для досліджуваної лапи $b = 0,15$ м, площа поперечного перерізу шару ґрунту, що деформується

$$S = b \cdot h. \quad (3.2)$$

Об'єм деформованого ґрунту, що припадає на одиницю довжини шляху лапи

$$V = S \cdot l, \quad (3.3)$$

де l – пройдений шлях.

Загальний тяговий опір стрілкової лапи можна подати у вигляді суми складових

$$R = R_p \cdot R_d \cdot R_T. \quad (3.4)$$

де R_p – опір різанню ґрунту;

R_d – опір деформації та переміщенню ґрунтового клина;

R_T – опір тертя ґрунту по робочій поверхні лапи.

Сила опору різанню пропорційна площі поперечного перерізу шару

$$R_p = q \cdot b \cdot h \quad (3.5)$$

де q – питомий опір ґрунту різанню, Н/м².

Ця складова характеризує енерговитрати на відокремлення шару ґрунту від масиву.

При переміщенні лапи ґрунтовий клин піднімається по її робочій поверхні. Сила, необхідна для цього, визначається вагою клина та умовами його зсуву.

Вага ґрунтового клина

$$G = \rho \cdot g \cdot V \quad (3.6)$$

де ρ – густина ґрунту, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

Горизонтальна складова сили, необхідної для переміщення клина:

$$R_d = G \cdot \sin(\alpha + \varphi). \quad (3.7)$$

Нормальна реакція ґрунту на робочу поверхню лапи:

$$N = G \cdot \cos(\alpha + \varphi). \quad (3.8)$$

Сила тертя

$$R_t = N \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (3.9)$$

Загальна формула тягового опору. Після підстановки складових одержимо

$$R = qbh + \rho gbh \cdot \sin(\alpha + \varphi) + \rho gbh \cdot \cos(\alpha + \varphi) \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (3.10)$$

або

$$R = bh[q + \rho g \sin(\alpha + \varphi) + \cos(\alpha + \varphi) \cdot \operatorname{tg} \delta]. \quad (3.11)$$

Отримана залежність показує, що тяговий опір стрілкової лапи прямо пропорційний ширині захвату та глибині обробітку, залежить від кутів різання і тертя, визначається фізико-механічними властивостями ґрунту.

Зменшення тягового опору можливе шляхом оптимізації кута різання, зменшення кута кришіння, раціоналізації форми робочої поверхні.

3.5. Нормована залежність тягового опору та вплив кута різання.

Для узагальнення результатів та можливості аналізу без прив'язки до конкретних ґрунтових умов введемо нормований (безрозмірний) тяговий опір

$$\bar{R} = \frac{R}{b \cdot h \cdot q}, \quad (3.12)$$

де b – ширина захвату лапи;
 h – глибина обробітку;
 q – питомий опір ґрунту різанню.

Використовуючи залежність, отриману в п. 3.5, нормована форма набуває вигляду

$$\bar{R} = 1 + K(\sin(\alpha + \varphi) + \cos(\alpha + \varphi) \cdot \operatorname{tg} \delta). \quad (3.13)$$

де φ – кут внутрішнього тертя ґрунту;
 δ – кут тертя ґрунту по сталі;

$K = \frac{\rho g}{q}$ – безрозмірний параметр, що відображає відносний вплив

«вагової» складової в порівнянні з опором різанню.

З аналізу $\bar{R}(\alpha)$ випливає, що зі збільшенням кута різання α зростають деформаційні та тертьові втрати, внаслідок чого збільшується тяговий опір. При цьому чутливість опору до α зростає для ґрунтів з більшим кутом внутрішнього тертя φ .

Рисунок 3.4 показує характер залежності $\bar{R}(\alpha)$ у діапазоні $\alpha = 15...35^\circ$ для типових значень φ . Як видно з рис. 3.4, нормований тяговий опір стрілкової лапи $\bar{R}$ є зростаючою функцією кута різання α у всьому досліджуваному діапазоні $15...35^\circ$. Характер зміни кривих свідчить про нелінійну залежність, що пояснюється одночасним впливом деформаційної та тертьової складових опору, величина яких визначається тригонометричними функціями від суми кутів $(\alpha + \varphi)$.

У початковій частині діапазону (приблизно $15...20^0$) інтенсивність зростання $\bar{R}$ є незначною. Це пов'язано з тим, що при малих значеннях кута різання лапа працює у більш «ковзному» режимі, коли переважає процес зрізання ґрунту з мінімальним його підніманням по робочій поверхні. У цих умовах деформація ґрунтового клина та нормальні реакції на робочій поверхні є відносно невеликими, що обумовлює менші енерговитрати.

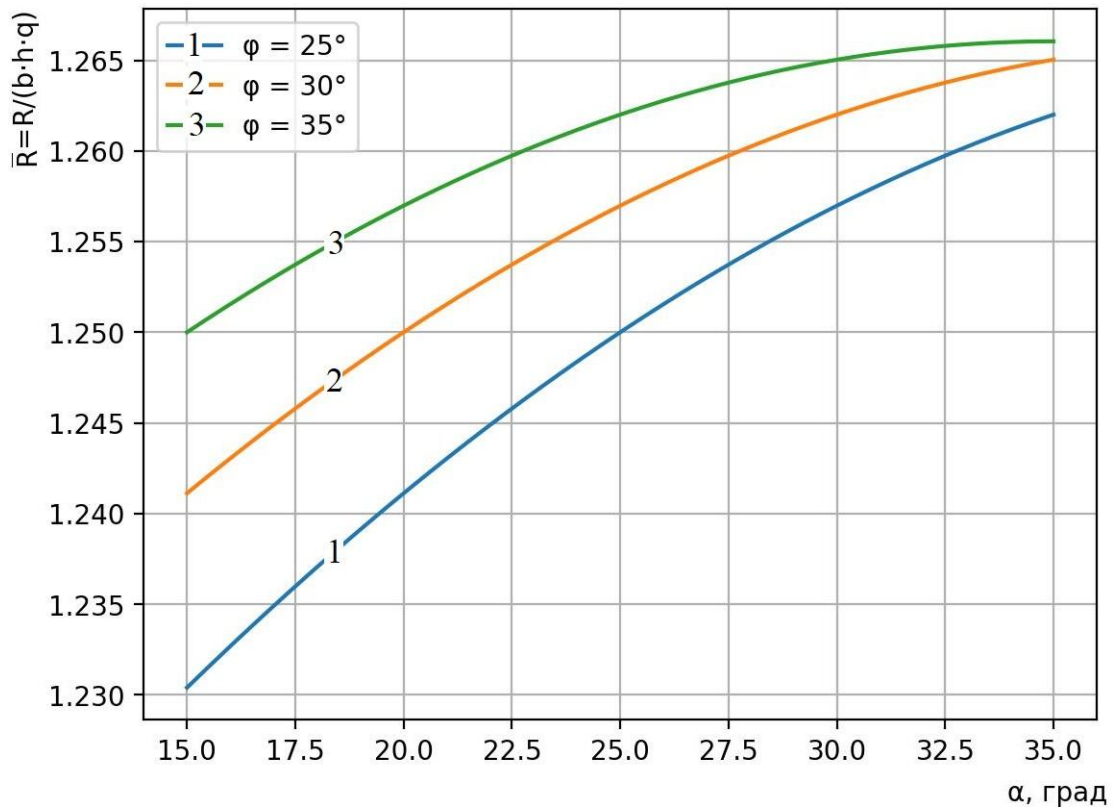


Рисунок 3.4 – Вплив α на нормований опір

При подальшому збільшенні кута різання ($20...30^0$) спостерігається більш інтенсивне зростання нормованого тягового опору. Це пояснюється тим, що зі збільшенням α змінюється кінематика переміщення ґрунту: зростає висота піднімання ґрунтового клина по робочій поверхні лапи, збільшується нормальна складова реакції ґрунту та відповідно сила тертя. У результаті різко зростає частка енергії, що витрачається на деформацію і переміщення ґрунту.

У зоні більших значень кута різання ($30...35^0$) криві мають найбільший нахил, що свідчить про істотне збільшення енергоємності процесу. За таких

кутів лапа працює в режимі активного піднімання та відкидання ґрунту, що супроводжується формуванням значного за об'ємом ґрунтового клина і, як наслідок, різким зростанням тягового опору.

Порівняння кривих, побудованих для різних значень кута внутрішнього тертя ґрунту φ , показує, що зі збільшенням φ абсолютний рівень нормованого опору зростає в усьому діапазоні зміни α . Це пояснюється підвищенням опору зсуву ґрунту та збільшенням сил внутрішнього тертя в ґрунтовому клині. Крім того, для ґрунтів з більшим значенням φ криві мають більший нахил, тобто тяговий опір стає більш чутливим до зміни кута різання.

Аналіз графіка дозволяє зробити важливий практичний висновок: у діапазоні малих значень кута різання забезпечується мінімальна енергоємність процесу, однак надмірне зменшення α може призвести до погіршення підрізання бур'янів і нестабільності ходу лапи по глибині. З іншого боку, збільшення кута різання понад раціональні значення викликає різке зростання тягового опору і енерговитрат.

Таким чином, підтверджується існування області раціональних значень кута різання стрілкової лапи, у якій забезпечується компроміс між мінімальним тяговим опором і необхідною якістю технологічного процесу. Отримана залежність є теоретичною передумовою для подальшого обґрунтування геометричних параметрів удосконаленої лапи.

Особливого значення отримана залежність набуває при аналізі умов міжрядного обробітку цукрових буряків, де поряд з енергоємністю процесу визначальним є збереження захисної зони рядка. На ранніх фазах розвитку рослин коренева система розміщена у верхньому шарі ґрунту, а надземна частина має малу механічну міцність, тому навіть незначне поперечне переміщення ґрунту може призвести до їх присипання або пошкодження. У цих умовах доцільним є використання менших значень кута різання α , які, як видно з рис. 3.4, забезпечують мінімальний тяговий опір і більш

«ковзний» характер взаємодії лапи з ґрунтом без інтенсивного піднімання ґрунтового клина.

На пізніших фазах розвитку культури, коли рослини мають розвинену кореневу систему і здатні витримувати часткове підгортання, агротехнічні вимоги змінюються. У цьому випадку підвищення кута різання в межах раціонального діапазону є доцільним, оскільки забезпечує більш повне підрізання бур'янів і інтенсивніше розпушування ґрунту. Однак, як впливає з характеру кривих на рис. 3.4, таке збільшення α супроводжується зростанням тягового опору, що призводить до підвищення енерговитрат машинно-тракторного агрегату.

Раціональний кут різання визначають із умови мінімізації опору за фіксованих властивостей ґрунту. У спрощеній постановці (коли домінує зріз і зсув ґрунту, а кінематика потоку стабільна) застосовується оцінка

$$\alpha_{opt} = 45^{\circ} - \frac{\varphi}{2}. \quad (3.14)$$

Це значення приймається як базове при обґрунтуванні параметрів удосконаленої лапи. Залежність показує, що зі зростанням внутрішнього тертя ґрунту φ раціональний кут різання α_{opt} зменшується, тобто для важчих ґрунтів доцільне менш «агресивне» різання. На рис. 3.5 наведено залежність раціонального кута різання стрілкової лапи α_{opt} від кута внутрішнього тертя ґрунту $\varphi = 20...40^{\circ}$.

Графік має вигляд спадної прямої лінії, що свідчить про лінійний характер впливу фізико-механічних властивостей ґрунту на раціональні геометричні параметри робочого органу.

Фізичний зміст отриманої залежності полягає в тому, що зі збільшенням кута внутрішнього тертя ґрунту зростає опір його зсуву по площинах ковзання. У таких умовах переміщення ґрунтового клина по робочій поверхні лапи супроводжується значними енерговитратами, тому для зменшення тягового опору необхідно зменшувати кут різання α . Це

забезпечує більш сприятливий режим взаємодії лапи з ґрунтом, при якому зменшується висота піднімання ґрунтового шару та нормальні реакції на робочій поверхні.

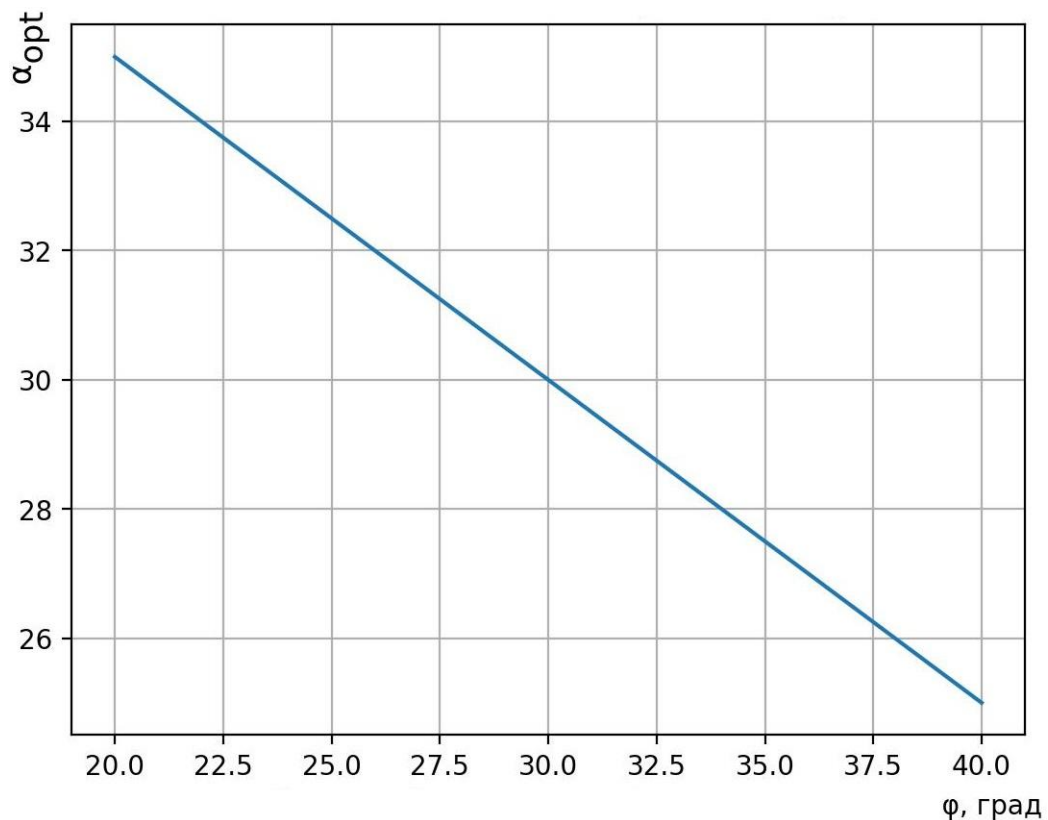


Рисунок 3.5 – Залежність $\alpha_{орт}$ від φ

Для ґрунтів з меншими значеннями φ (легкі та добре структуровані ґрунти) допустиме використання більших кутів різання, оскільки їх деформація відбувається з меншими енерговитратами. У цьому випадку підвищення α сприяє інтенсифікації процесу розпушування та покращує підрізання бур'янів без істотного збільшення тягового опору.

У діапазоні значень $\varphi = 20...40^\circ$, характерному для більшості мінеральних ґрунтів, раціональний кут різання змінюється приблизно від 35° до 25° . Саме цей інтервал охоплює практично всі конструктивні рішення стрічастих лап культиваторів, що підтверджує узгодженість теоретичних положень з існуючими конструкціями робочих органів.

З агротехнічної точки зору отримана залежність має важливе значення для міжрядного обробітку просапних культур. На ранніх фазах розвитку цукрових буряків обробіток, як правило, проводиться при підвищеній вологості ґрунту, коли значення φ є меншим. Це допускає використання дещо більших кутів різання, що забезпечує якісне підрізання бур'янів. У міру підсихання ґрунту та зростання його щільності кут внутрішнього тертя збільшується, тому для зниження енергоємності процесу доцільно застосовувати лапи з меншими значеннями α .

Таким чином, залежність, наведена на рис. 3.5, підтверджує, що раціональний кут різання стрілчастої лапи не є сталою величиною, а визначається властивостями ґрунту та умовами роботи. Це створює теоретичні передумови для вдосконалення конструкції лапи шляхом вибору таких геометричних параметрів, які забезпечують роботу в області мінімального тягового опору при збереженні необхідної якості технологічного процесу.

Отримані результати також пояснюють доцільність застосування удосконаленої форми робочої поверхні лапи, яка дозволяє реалізувати раціональний кут різання не лише конструктивно, але й кінематично – за рахунок керованого переміщення ґрунтового потоку та стабілізації умов його деформації.

3.6. Якісний показник бокового переміщення ґрунту та умова збереження захисної зони рядка.

Для міжрядного обробітку цукрових буряків (міжряддя 45 см) критичним показником є переміщення ґрунту в напрямку рядка, що може спричиняти присипання рослин, особливо на ранніх фазах розвитку. З цією метою вводимо якісний індекс бокового виносу ґрунту I_s , який відображає тенденцію до поперечного переносу ґрунтового потоку робочою поверхнею лапи.

У першому наближенні приймаємо

$$I_s = \tan \gamma (1 + c \sin \alpha), \quad (3.15)$$

де γ – кут кришіння/підйому ґрунту (характеризує інтенсивність піднімання та розпушування);

c – коефіцієнт, який враховує вплив кута різання α на інтенсивність поперечного переміщення.

Із залежності випливає:

- зі зростанням γ інтенсивність бокового переносу зростає різко (через $\tan \gamma$;
- при більших α (агресивніше різання) також зростає ризик переміщення ґрунту до рядка.

На рис. 3.6 наведено залежність якісного показника бокового переміщення ґрунту I_s від кута кришіння (підйому ґрунту) γ при різних значеннях кута різання α .

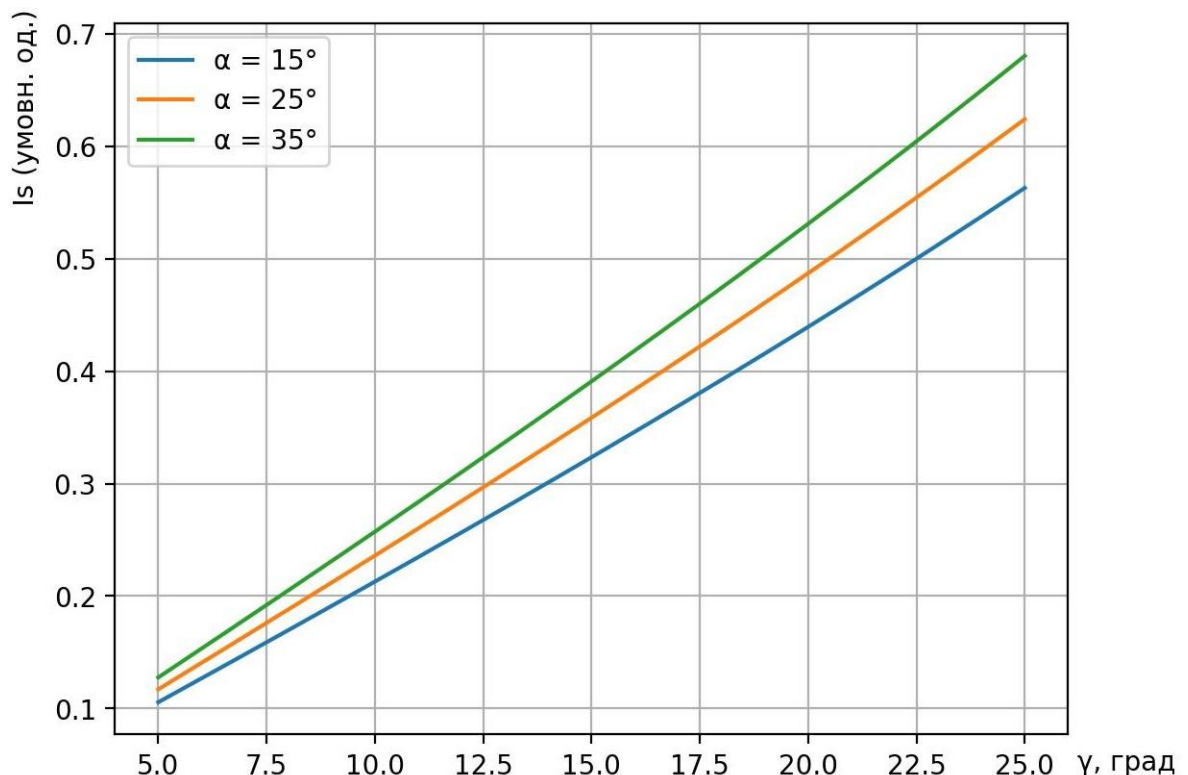


Рисунок 3.6 – Вплив γ на індекс бокового виносу I_s

Даний показник характеризує інтенсивність поперечного переносу ґрунтового потоку робочою поверхнею стрілкової лапи у напрямку рядка культури і, відповідно, ступінь ризику присипання рослин під час міжрядного обробітку.

Із графіка видно, що для всіх досліджуваних значень кута різання залежність $I_s(\gamma)$ має різко зростаючий нелінійний характер. Це пояснюється тим, що при збільшенні кута γ робоча поверхня лапи інтенсивніше піднімає ґрунтовий шар угору, внаслідок чого зростає швидкість і дальність переміщення частинок ґрунту. Оскільки в аналітичному виразі показника присутня функція $\operatorname{tg} \gamma$, то навіть незначне збільшення кута кришіння у верхній частині досліджуваного діапазону викликає істотне зростання бокового виносу ґрунту.

У початковій області значень ($\gamma = 5 \dots 10^\circ$) зміна показника I_s є незначною, що відповідає режиму роботи лапи з переважанням процесу підрізання і розпушування без інтенсивного піднімання ґрунту. У цих умовах ґрунтовий потік переміщується переважно в поздовжньому напрямку відносно руху агрегату, що забезпечує мінімальний вплив на захисну зону рядка.

При збільшенні кута до $\gamma = 15 \dots 20^\circ$ спостерігається суттєве зростання показника I_s . Це пов'язано з формуванням більш потужного ґрунтового клина, який переміщується по робочій поверхні лапи з подальшим відкиданням у боковому напрямку. У результаті зростає ймовірність переміщення ґрунту до рядка і часткового присипання рослин.

Порівняння кривих, побудованих для різних значень кута різання α , показує, що зі збільшенням α інтенсивність бокового переміщення ґрунту зростає в усьому діапазоні зміни γ . Це пояснюється тим, що при більших кутах різання збільшується об'єм деформованого ґрунтового клина і

нормальна реакція на робочій поверхні, що сприяє більш активному переміщенню ґрунтового потоку в поперечному напрямку.

З агротехнічної точки зору отримані залежності мають особливе значення для ранніх фаз розвитку цукрових буряків, коли необхідно забезпечити максимальне збереження захисної зони рядка. У цьому випадку доцільно застосовувати менші значення як кута різання α , так і кута кришіння γ , що забезпечує мінімальне значення показника I_S і, відповідно, зменшує ризик присипання рослин.

На пізніших фазах розвитку культури, коли допускається часткове підгортання, можливе використання більших значень γ , що сприяє інтенсивнішому розпушуванню ґрунту і знищенню бур'янів. Однак навіть у цьому випадку, як видно з характеру кривих, збільшення γ повинно бути обмежене раціональними межами, оскільки надмірне зростання показника I_S призводить до зайвого переміщення ґрунту і підвищення енергоємності процесу.

Таким чином, аналіз рис. 3.6 показує, що кут кришіння є одним з визначальних параметрів, які впливають на формування ґрунтового потоку при роботі стрілкової лапи. Отримані залежності підтверджують необхідність обґрунтування такої геометрії робочої поверхні, яка забезпечує обмеження бокового переміщення ґрунту при збереженні високої якості розпушування. Це є теоретичною передумовою для застосування удосконаленої конструкції лапи з керованим напрямком руху ґрунтового потоку.

3.7. Компромісний критерій вибору параметрів для двох стадій розвитку буряка.

Оскільки для буряка необхідно одночасно зменшувати енергоємність і зберігати захисну зону рядка, вводимо компромісний критерій

$$J(\alpha, \gamma) = \omega_1 \bar{R}(\alpha) + \omega_2 I_S(\alpha, \gamma), \quad (3.16)$$

де ω_1 і ω_2 – вагові коефіцієнти, що відображають пріоритети технологічного процесу на різних фазах розвитку культури.

Рання фаза (2–6 листків) – пріоритет захисної зони високий $\rightarrow \omega_2 > \omega_1$.

Пізня фаза (зімкнення рядків/до підгортання) – пріоритет більш збалансований $\rightarrow \omega_2 \approx \omega_1$.

Рисунки 3.7 і 3.8 $J(\alpha, \gamma)$ дозволяють визначити область раціональних параметрів, а не одну точку. Для ранньої фази мінімум J зміщується в бік менших γ (щоб мінімізувати боковий винос), тоді як для пізньої фази допускаються більші γ за умови прийнятного рівня $\bar{R}$.

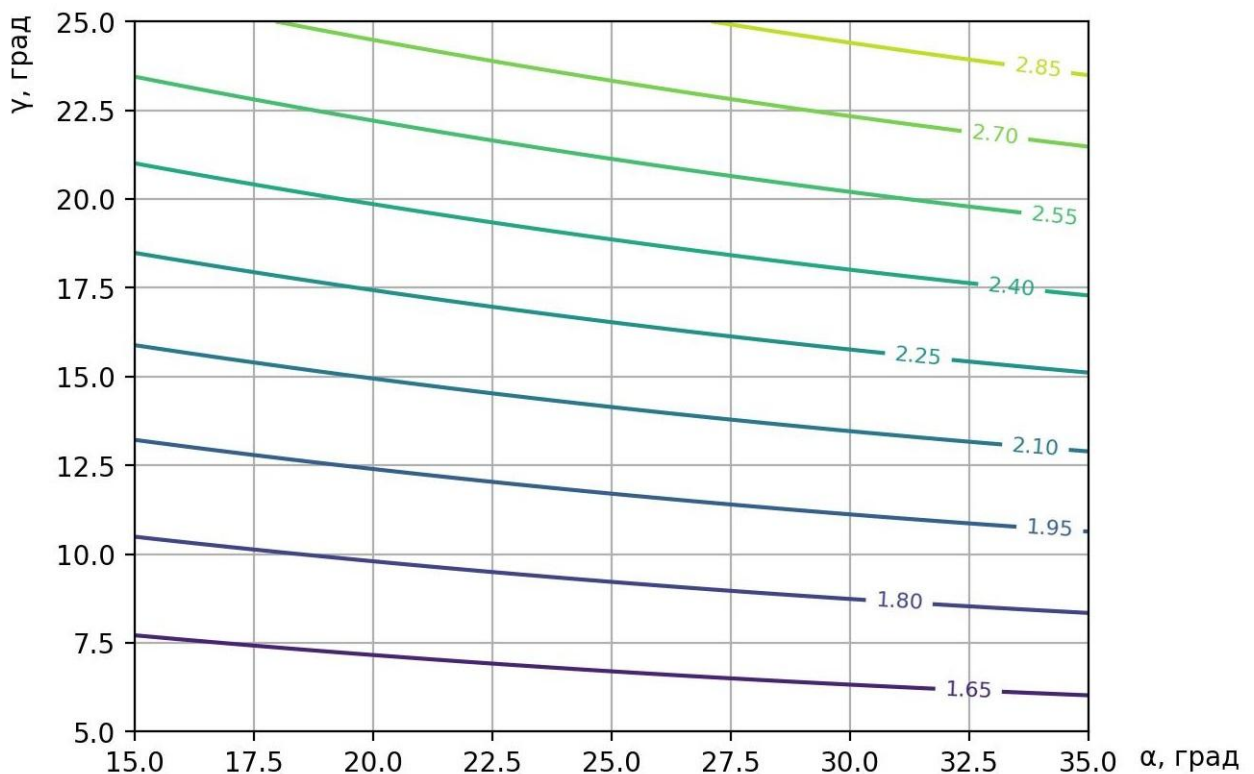


Рисунок 3.7 – Рання фаза (вищий пріоритет захисної зони)

На рис. 3.7 наведено графік узагальненого критерію ефективності $J(\alpha, \gamma)$ побудовану для умов ранньої фази розвитку цукрових буряків, коли пріоритетним є збереження захисної зони рядка. По осі абсцис відкладено кут різання стрілкової лапи α , а по осі ординат – кут кришіння (підйому ґрунту) γ . Ізолінії на графіку відповідають однаковим значенням критерію J .

і відображають сукупний вплив енергетичних витрат процесу та інтенсивності бокового переміщення ґрунту.

Характер розташування ізоліній свідчить про те, що в умовах ранньої фази розвитку культури визначальним фактором є саме показник бокового переміщення ґрунту I_s . Це проявляється у значному згущенні ізоліній у напрямку збільшення кута γ , що означає різке погіршення значення критерію навіть при незначному зростанні кута підйому ґрунту. Така закономірність узгоджується з результатами аналізу рис. 3.5 і пояснюється високою чутливістю процесу до поперечного переміщення ґрунтового потоку в зоні рядка.

У напрямку збільшення кута різання α ізолінії мають більш пологий характер, що свідчить про менший вплив цієї величини на значення критерію у порівнянні з кутом γ . Це пояснюється тим, що при прийнятих вагових коефіцієнтах основний внесок у формування критерію здійснює саме агротехнічний показник – інтенсивність бокового переміщення ґрунту, а не енергоємність процесу.

Область мінімальних значень критерію J розташована в зоні малих значень кутів α і γ . Це відповідає режиму роботи стрілкової лапи, при якому:

- зменшується висота піднімання ґрунтового клина;
- обмежується поперечне переміщення ґрунту;
- забезпечується «ковзний» характер взаємодії робочої поверхні з ґрунтом;
- мінімізується ризик присипання рослин.

Разом з тим надмірне зменшення кута різання α може призводити до погіршення умов підрізання бур'янів і нестабільності ходу лапи по глибині. Тому область раціональних параметрів має вигляд не окремої точки, а певної зони, в межах якої забезпечується допустимий компроміс між енергетичними та агротехнічними показниками процесу.

Аналіз рис. 3.7 показує, що для ранньої фази розвитку цукрових буряків доцільно застосовувати стрілчасті лапи з відносно малими значеннями кута кришіння γ та помірними значеннями кута різання α . Саме в цій області досягається мінімальне значення узагальненого критерію, що відповідає умовам найбільш ефективного та безпечного міжрядного обробітку.

З конструктивної точки зору це означає необхідність формування такої геометрії робочої поверхні лапи, яка забезпечує переважно поздовжнє переміщення ґрунтового потоку з його частковим опусканням вниз, а не інтенсивне відкидання у боковому напрямку. Саме такий характер взаємодії з ґрунтом реалізується в удосконаленій конструкції лапи з криволінійною ріжучою кромкою і просторовою формою робочої поверхні, що дозволяє зменшити значення показника I_s без істотного збільшення тягового опору.

Таким чином, рис. 3.7 підтверджує, що при міжрядному обробітку цукрових буряків на ранніх фазах розвитку раціональні параметри стрілчастої лапи визначаються передусім умовою обмеження бокового переміщення ґрунту, що є теоретичною основою для обґрунтування її вдосконаленої конструкції.

На рис. 3.8 наведено графік узагальненого критерію ефективності $J(\alpha, \gamma)$ побудований для умов пізньої фази розвитку цукрових буряків, коли вимоги до збереження захисної зони рядка зменшуються, а вагові коефіцієнти енергетичної та агротехнічної складових стають співрозмірними.

На відміну від рис. 3.7, де домінував вплив показника бокового переміщення ґрунту, у даному випадку спостерігається більш збалансований характер розташування ізоліній. Це свідчить про те, що на формування значення критерію J істотно впливають як енергоємність процесу, так і інтенсивність переміщення ґрунтового потоку.

Ізолінії мають більш рівномірний нахил у напрямках зміни кутів α і γ , що означає приблизно однакову чутливість критерію до обох параметрів.

Таким чином, у пізній фазі розвитку культури збільшення кута кришіння γ вже не призводить до такого різкого погіршення умов роботи, як це спостерігалось на рис. 3.7. Це пояснюється тим, що розвинені рослини здатні витримувати часткове підгортання, а формування гребеня у міжрядді навіть є агротехнічно доцільним.

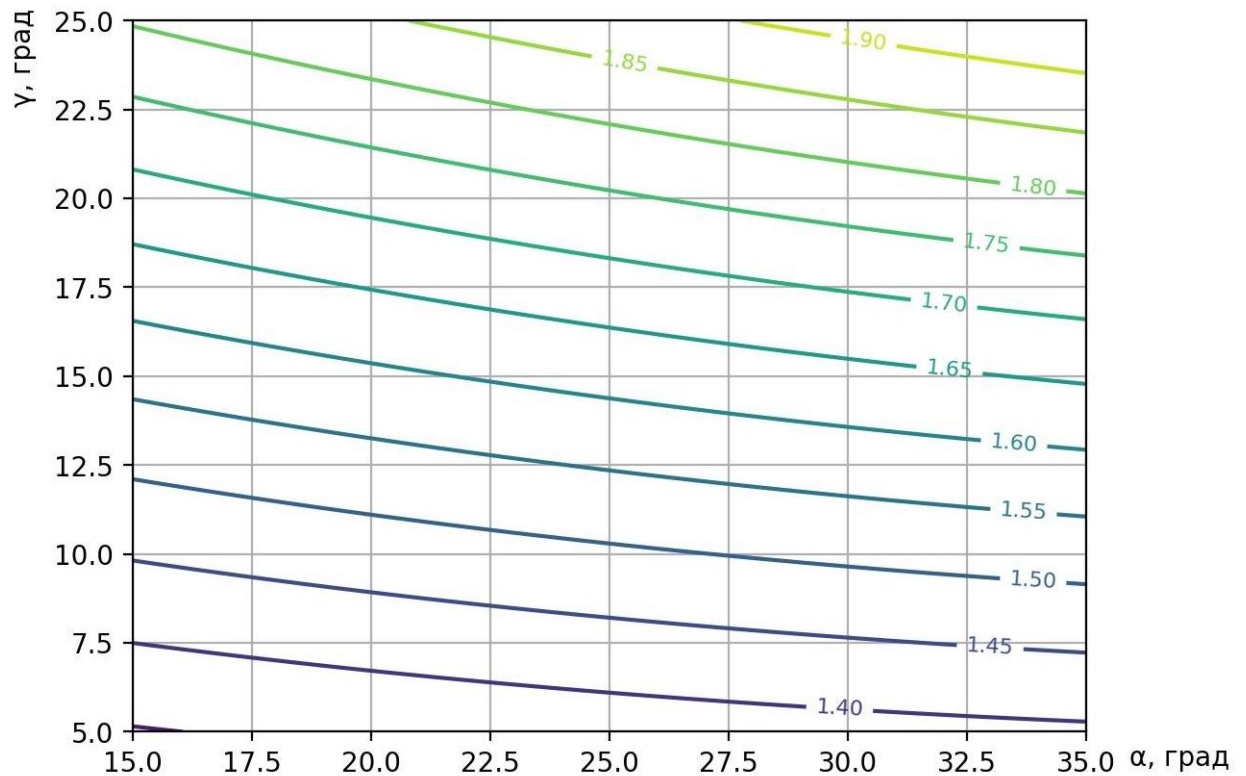


Рисунок 3.8 – Пізня фаза (збалансований пріоритет)

Область мінімальних значень критерію зміщується у зону дещо більших значень кута різання α і кута кришіння γ . Такий характер залежності свідчить про те, що в цих умовах раціональним є більш інтенсивний режим взаємодії лапи з ґрунтом, при якому:

- забезпечується активніше розпушування міжряддя;
- підвищується повнота підрізання бур'янів;
- формується вирівняний мікрорельєф поверхні ґрунту;
- створюються передумови для часткового підгортання рослин.

Разом з тим збільшення кута різання супроводжується зростанням тягового опору, що проявляється у зближенні ізоліній у правій частині

графіка. Це свідчить про підвищення енергоємності процесу і визначає верхню межу раціональних значень α .

Аналогічно, при надмірному збільшенні кута кришіння γ спостерігається вихід у зону більших значень критерію, що пов'язано з інтенсивним переміщенням ґрунту та додатковими витратами енергії на його піднімання і відкидання.

Таким чином, область раціональних параметрів для пізньої фази розвитку цукрових буряків розташована в зоні середніх значень кутів α і γ , що забезпечує компроміс між високою якістю розпушування, ефективним знищенням бур'янів та прийнятною енергоємністю процесу.

Порівняння рис. 3.8 з рис. 3.7 показує, що зі зміною агротехнічних вимог відбувається зміщення області мінімуму критерію у напрямку більших значень геометричних параметрів робочого органу. Це підтверджує необхідність обґрунтування таких конструктивних параметрів стрілкової лапи, які забезпечують можливість її ефективної роботи в широкому діапазоні умов, характерних для різних фаз розвитку культури.

3.8. Висновки по розділу.

В розділі розроблено фізичну модель взаємодії стрілкової лапи з ґрунтом на основі рівноваги ґрунтового клина. Отримано аналітичну залежність для визначення тягового опору лапи з урахуванням її геометричних параметрів і фізико-механічних властивостей ґрунту. Встановлено, що зі збільшенням кута різання тяговий опір зростає нелінійно.

Обґрунтовано вплив кута кришіння на інтенсивність бокового переміщення ґрунту та умову збереження захисної зони рядка. Визначено області раціональних параметрів стрілкової лапи для різних фаз розвитку цукрових буряків.

Отримані результати є теоретичною основою для інженерного розрахунку параметрів удосконаленої лапи в розділі 4.

4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Вихідні дані для проектування і розрахунку.

Проектування удосконаленої стрілчастої лапи культиватора міжрядного обробітку виконують з урахуванням агротехнічних вимог до обробітку посівів цукрових буряків, параметрів базової машини та фізико-механічних властивостей ґрунту.

За базову машину прийнято культиватор УСМК-5,4, який агрегатується з трактором ПМЗ-10280.

Основні агротехнічні вимоги до міжрядного обробітку цукрових буряків:

- забезпечення повного підрізання бур'янів у міжряддях;
- розпушування ґрунту без виносу його в захисну зону рядка;
- збереження заданої глибини обробітку;
- формування вирівняної поверхні поля.

Міжряддя посівів становить 45 см. Ширина захисної зони рядка – 0,08...0,10 м з кожного боку. Глибина міжрядного обробітку залежно від фази розвитку рослин становить: для ранньої фази – 6...8 см; для пізньої фази – 8...12 см. Робоча швидкість агрегату приймається в межах 6...9 км/год. Ширина стрілчастої лапи, що проектується, становить – 150 мм.

Фізико-механічні властивості ґрунту, прийняті для розрахунків:

- щільність ґрунту $\rho = 1200...1300 \text{ кг/м}^3$;
- кут внутрішнього тертя $\varphi = 28...32^\circ$;
- питомий опір різанню $k = 35...55 \text{ кН/м}^2$;
- вологість ґрунту – 18...22 %;
- кут тертя ґрунту по сталі приймається рівним – $\varphi_{ст} = 16...18^\circ$.

Кількість робочих органів культиватора УСМК-5,4 визначається з урахуванням ширини захвату машини та міжряддя культури. Тягово-

енергетичні показники визначаються для агрегату у складі трактора ПМЗ-10280, номінальна потужність двигуна якого становить 80 кВт.

При виконанні розрахунків використовуються теоретичні залежності, отримані в розділі 3, які встановлюють взаємозв'язок між геометричними параметрами стрілкової лапи, фізико-механічними властивостями ґрунту та тяговим опором робочого органу.

На основі наведених вихідних даних визначаються:

- раціональні конструктивні параметри лапи;
- тяговий опір робочого органу;
- навантаження на стійку;
- енергетичні показники роботи культиватора.

4.2. Обґрунтування конструктивної схеми удосконаленої стрілкової лапи.

Аналіз роботи серійних стрілчастих лап культиватора УСМК-5,4 показує, що їх конструктивні параметри не повною мірою забезпечують оптимальне поєднання агротехнічних та енергетичних показників при міжрядному обробітку посівів цукрових буряків. Зокрема, зі збільшенням кута різання зростає тяговий опір робочого органу, а зі зменшенням – погіршується підрізання бур'янів і стабільність ходу по глибині. Крім того, значний кут розхилу крил лапи спричиняє інтенсивне бокове переміщення ґрунту, що призводить до засипання захисної зони рядка.

У розділі 3 на основі теоретичних досліджень встановлено, що тяговий опір лапи визначається її геометричними параметрами, фізико-механічними властивостями ґрунту та умовами роботи. Отримані залежності дозволяють визначити раціональні значення кута різання та кута розхилу крил лапи з урахуванням обмежень на переміщення ґрунту в захисну зону рядка.

Удосконалення конструкції стрілкової лапи передбачається здійснити за рахунок:

- встановлення раціонального кута різання, що забезпечує мінімальний тяговий опір при збереженні необхідної якості підрізання бур'янів;

- обґрунтованого вибору кута розхилу крил лапи, при якому зменшується інтенсивність бокового переміщення ґрунту;
- зміни геометрії різальної частини крила з метою стабілізації глибини обробітку та зниження енергоємності процесу.

Конструктивна схема удосконаленої лапи приймається на базі серійної лапи культиватора УСМК-5,4, що дозволяє використовувати існуючу стійку та вузли кріплення без їх зміни (рис. 4.1). Це забезпечує взаємозамінність робочих органів і не потребує переобладнання культиватора.

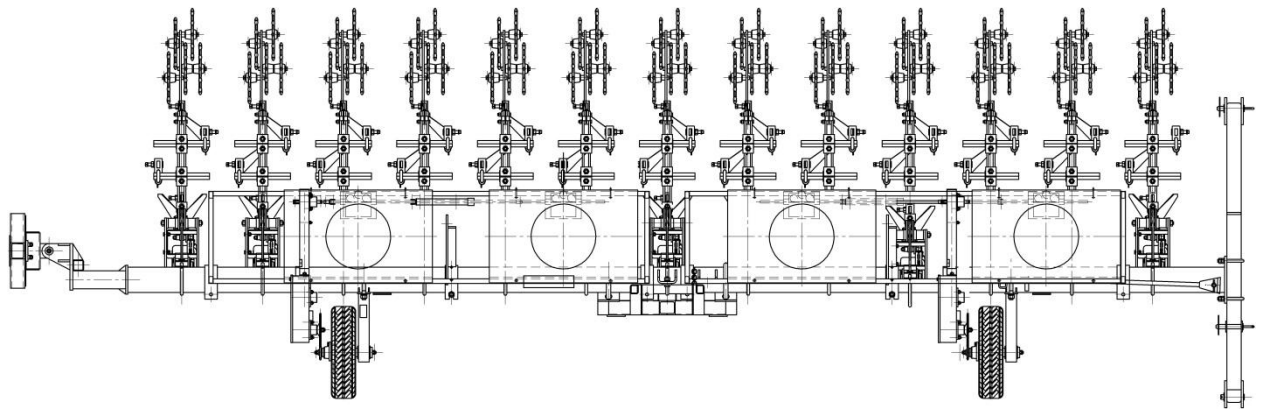


Рисунок 4.1 – Загальний вигляд культиватора

Ширина лапи приймається рівною 150 мм, що відповідає агротехнічним вимогам до міжрядного обробітку цукрових буряків при міжрядді 45 см і забезпечує повне підрізання бур'янів у міжрядді.

Рациональні значення кута різання та кута розхилу крил визначаються на основі отриманих у розділі 3 теоретичних залежностей та графічних результатів досліджень.

Запропонована конструкція лапи (рис. 4.2) забезпечує:

- зменшення тягового опору робочого органу;
- зниження енергоємності міжрядного обробітку;
- зменшення переміщення ґрунту в захисну зону рядка;
- підвищення якості підрізання бур'янів;
- стабільність роботи по заданій глибині.

Прийнята конструктивна схема є основою для подальшого визначення геометричних параметрів лапи та виконання інженерних розрахунків.

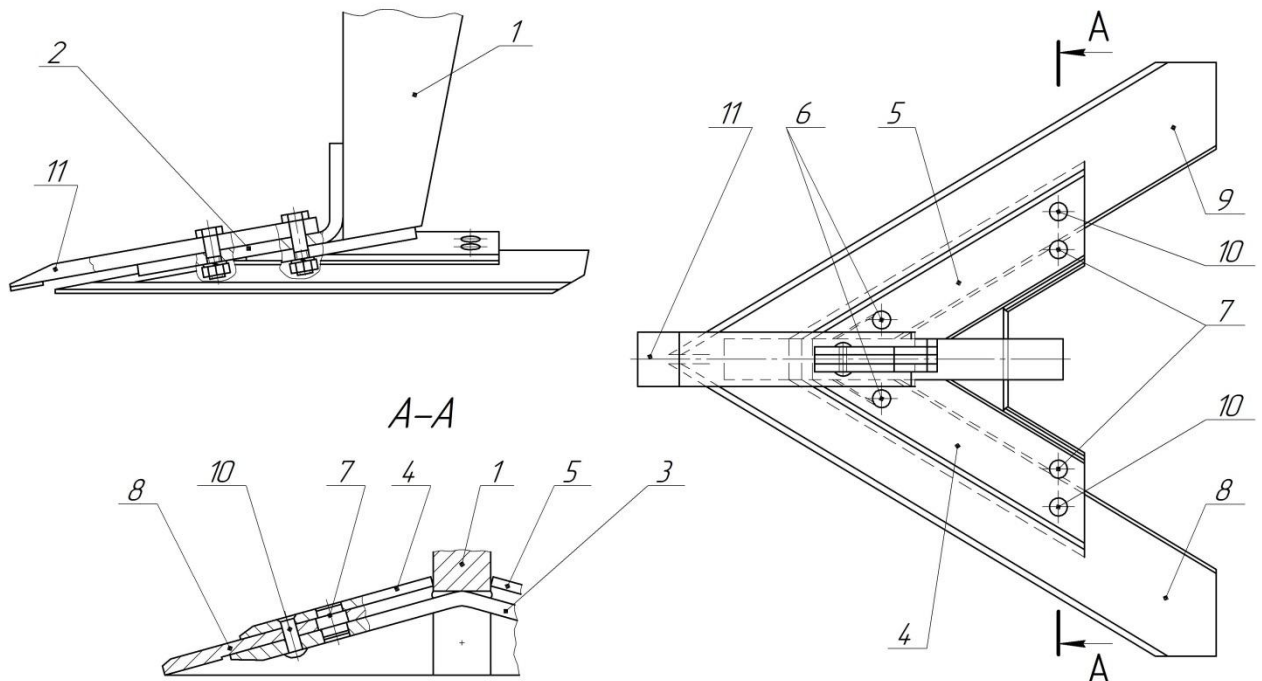


Рисунок 4.2 – Запропонована конструкція стрілкової лапи: 1 – стояк; 2 – основа лапи; 3 – підшва; 4, 5 – ліва і права накладки; 6, 7 – упори; 8, 9 – леза; 10 – кріпильний елемент; 11 – долото

4.3. Вибір та обґрунтування основних параметрів стрілкової лапи.

Вибір основних геометричних параметрів стрілкової лапи здійснюється на основі теоретичних залежностей, отриманих у розділі 3, з урахуванням агротехнічних вимог до міжрядного обробітку цукрових буряків.

Розрахунок виконуємо для двох характерних глибин обробітку:

- для ранньої фази розвитку рослин – $h_1 = 0,06$ м;
- для пізньої фази – $h_2 = 0,10$ м.

Ширину стрілкової лапи приймаємо – $b = 0,15$ м.

Рациональне значення кута різання визначимо за залежністю

$$\alpha_{opt} = 45^\circ - \frac{\varphi}{2}. \quad (4.1)$$

При середньому значенні кута внутрішнього тертя ґрунту $\varphi = 30^\circ$ одержимо

$$\alpha_{opt} = 45^\circ - 15^\circ = 30^\circ.$$

Прийняте значення кута різання забезпечує мінімальний тяговий опір лапи при задовільній якості підрізання бур'янів.

Кут розхилу крил лапи вибирають з урахуванням обмеження переміщення ґрунту в захисну зону рядка. Відповідно до результатів теоретичних досліджень (розділ 3), раціональне значення кута становить

$$2\gamma = 60^\circ, \gamma = 30^\circ.$$

Таке значення кута забезпечує:

- повне перекриття оброблюваної смуги;
- зменшення бокового виносу ґрунту;
- допустимий рівень тягового опору.

Довжину крила визначаємо із геометричних міркувань

$$l = \frac{b}{2\sin\gamma}. \quad (4.2)$$

Одержимо

$$l = \frac{0,15}{2 \cdot 0,5} = 0,15 \text{ м.}$$

Визначаємо площу поперечного перерізу зрізаного шару ґрунту.

Для ранньої фази

$$A_1 = b \cdot h_1. \quad (4.3)$$

$$A_1 = 0,15 \cdot 0,06 = 0,009 \text{ м}^2.$$

Для пізньої фази

$$A_2 = b \cdot h_2. \quad (4.4)$$

$$A_1 = 0,15 \cdot 0,10 = 0,015 \text{ м}^2.$$

Вибір кута загострення різальної кромки. Кут загострення приймаємо у межах $\beta = 18...22^0$, що забезпечує – зменшення опору різанню та достатню зносостійкість леза. Приймаємо $\beta = 20^0$.

У результаті розрахунку встановлено основні геометричні параметри удосконаленої стрілкової лапи:

- ширина лапи – $b = 0,15$ м;
- кут різання – $\alpha_{ont} = 30^0$;
- кут розхилу крил – $2\gamma = 60^0$;
- довжина крила – $l = 0,15$ м;
- кут загострення різальної кромки – $\beta = 20^0$.

Прийняті параметри забезпечують виконання агротехнічних вимог до міжрядного обробітку цукрових буряків та є вихідними даними для подальшого визначення тягового опору лапи.

4.4. Розрахунок тягового опору удосконаленої стрілкової лапи.

Тяговий опір стрілкової лапи визначаємо за залежністю, отриманою в розділі 3, у вигляді

$$R = b \cdot h [k + \rho g (\sin(\alpha + \varphi) + \cos(\alpha + \varphi) \operatorname{tg} \varphi_{cm})]. \quad (4.5)$$

- де b – ширина лапи, м;
- h – глибина обробітку, м;
- k – питомий опір різанню ґрунту, Н/м²;
- ρ – щільність ґрунту, кг/м³;
- g – прискорення вільного падіння, м/с²;
- α – кут різання;
- φ – кут внутрішнього тертя ґрунту;
- φ_{cm} – кут тертя ґрунту по сталі.

Для удосконаленої лапи прийнято (п. 4.3): $b = 0,15$ м, $\alpha = 30^0$.

Розрахунок виконуємо для двох режимів (фаз розвитку буряка):

$h_1 = 0,06$ м (рання фаза), $h_2 = 0,10$ м (пізня фаза).

Параметри ґрунту приймаємо діапазоном (п. 4.1): $\rho = 1200 \dots 1300$ кг/м³,
 $k = 35 \dots 55$ кН/м², $\varphi = 28 \dots 32^\circ$, $\varphi_{cm} = 16 \dots 18^\circ$.

Мінімум тягового опору відповідає одночасному прийняттю нижніх меж параметрів ґрунту $k_{\min} = 35 \cdot 10^3$ Н/м², $\rho_{\min} = 1200$ кг/м³, $\varphi_{\min} = 28^\circ$,
 $\varphi_{cm\min} = 16^\circ$.

Для глибини $h_1 = 0,06$ м

$$R_{\min 0,06} = 0,15 \cdot 0,06 [35000 + 1200 \cdot 9,81 (\sin 58^\circ + \cos 58^\circ \operatorname{tg} 16^\circ)] \approx 4,21 \cdot 10^2 \text{ Н.}$$

$$R_{\min 0,06} \approx 0,421 \text{ кН.}$$

Для глибини $h_1 = 0,10$ м

$$R_{\min 0,10} = 0,15 \cdot 0,10 [35000 + 1200 \cdot 9,81 (\sin 58^\circ + \cos 58^\circ \operatorname{tg} 16^\circ)] \approx 7,02 \cdot 10^2 \text{ Н.}$$

$$R_{\min 0,10} \approx 0,702 \text{ кН.}$$

Максимум тягового опору відповідає одночасному прийняттю верхніх меж параметрів ґрунту $k_{\max} = 55 \cdot 10^3$ Н/м², $\rho_{\max} = 1300$ кг/м³, $\varphi_{\max} = 32^\circ$,
 $\varphi_{cm\max} = 18^\circ$.

Для глибини $h_1 = 0,06$ м

$$R_{\max 0,06} = 0,15 \cdot 0,06 [55000 + 1300 \cdot 9,81 (\sin 62^\circ + \cos 62^\circ \operatorname{tg} 18^\circ)] \approx 6,141 \cdot 10^2 \text{ Н.}$$

$$R_{\max 0,06} \approx 0,614 \text{ кН.}$$

Для глибини $h_2 = 0,10$ м

$$R_{\max 0,10} = 0,15 \cdot 0,10 [55000 + 1300 \cdot 9,81 (\sin 62^\circ + \cos 62^\circ \operatorname{tg} 18^\circ)] \approx 1,023 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

$$R_{\max 0,10} \approx 1,023 \text{ кН.}$$

Отримані розрахункові значення тягового опору однієї стрілкової лапи в заданих умовах становлять:

— для ранньої фази $h_1 = 0,06$ м

$$R = 0,421...0,614 \text{ кН.}$$

- для пізньої фази $h_2 = 0,10 \text{ м}$

$$R = 0,702...1,023 \text{ кН.}$$

Збільшення глибини обробітку призводить до пропорційного зростання опору, оскільки у формулі (4.1) множник $b \cdot h$ безпосередньо масштабує величину тягового опору. Отриманий діапазон значень буде використаний надалі для визначення навантажень на стійку (пп. 4.5–4.6) та розрахунку тягово-енергетичних показників агрегату УСМК-5,4 з трактором ПМЗ-10280 (п. 4.7).

4.5. Розрахунок навантаження на стійку стрілкової лапи.

Для визначення навантаження на стійку приймаємо розрахункову схему прямої стійки як консольної балки, жорстко закріпленої в місці кріплення до рами культиватора. На нижній кінець стійки через стрілкову лапу діє результуюча сила опору ґрунту R , яка в першому наближенні прикладена в зоні середини робочої поверхні лапи. Найбільш небезпечним перерізом стійки є переріз у зоні кріплення до рами (біля хомута), де виникає максимальний згинальний момент.

Величину сили R приймаємо за результатами п. 4.4 для однієї лапи при двох глибинах обробітку:

- для ранньої фази $h_1 = 0,06 \text{ м}$

$$R_{0,06} = 0,421...0,614 \text{ кН.}$$

- для пізньої фази $h_2 = 0,10 \text{ м}$

$$R_{0,10} = 0,702...1,023 \text{ кН.}$$

Розрахунок навантаження на стійку виконуємо за найбільш несприятливим режимом роботи, тобто при максимальному значенні сили

$$R_{\max} = 1,023 \text{ кН.}$$

Плече прикладання сили опору відносно небезпечного перерізу позначимо L . Для прямої стійки культиватора УСМК-5,4 доцільно прийняти $L = 0,45$ м, що відповідає відстані від осі кріплення стійки до рами до умовного центра тиску ґрунту на лапу (в межах 0,40...0,50 м залежно від конструкції стояка та положення лапи).

Тоді максимальний згинальний момент у небезпечному перерізі

$$M_{\max} = R_{\max} \cdot L. \quad (4.6)$$

Підставляючи числові значення, одержимо

$$M_{\max} = 1023 \cdot 0,45 = 460 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Для оцінки роботи стійки в діапазоні режимів додатково визначимо моменти для мінімального та максимального навантаження при обох глибинах:

– для $h_1 = 0,06$ м

$$M_{0,06\min} = 421 \cdot 0,45 = 189 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$M_{0,06\max} = 614 \cdot 0,45 = 276 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

– для $h_1 = 0,10$ м

$$M_{0,10\min} = 702 \cdot 0,45 = 316 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$M_{0,10\max} = 1023 \cdot 0,45 = 460 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Отримані значення згинального моменту M будуть використані у наступному підрозділі для перевірного розрахунку стійки на міцність (п. 4.6) та визначення коефіцієнта запасу міцності.

4.6. Перевірочний розрахунок стійки на міцність.

Перевірку міцності прямої стійки виконуємо за умовою міцності при згині

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq [\sigma], \quad (4.7)$$

де M – згинальний момент у небезпечному перерізі, Н·м;

W – момент опору перерізу, м^3 ;

$[\sigma]$ – допустиме напруження для матеріалу стійки.

Визначення моменту опору перерізу для прямокутного перерізу

$$W = \frac{bs^2}{6}, \quad (4.8)$$

де b – ширина перерізу;

s – товщина перерізу.

Підставляючи $b = 0,03$ м, $s = 0,012$ м, одержимо

$$W = \frac{0,03 \cdot (0,012)^2}{6} = 7,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3.$$

Найбільш небезпечний режим відповідає

$$M_{\max} = 460 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Тоді

$$\sigma_{\max} = \frac{460}{7,2 \cdot 10^{-7}} = 6,39 \cdot 10^8 \text{ МПа}.$$

Допустиме напруження. Стійки культиваторів виготовляють із конструкційної сталі 65Г або 60С2А. Для сталі 65Г після термічної обробки приймаємо

$$[\sigma] = 800 \text{ МПа}.$$

Коефіцієнт запасу міцності

$$n = \frac{[\sigma]}{\sigma_{\max}}.$$

$$n = \frac{800}{639} = 1,25.$$

Отримане значення коефіцієнта запасу міцності $n = 1,25$ задовольняє умови міцності для сільськогосподарських машин (допустиме значення $n = 1,2 \dots 1,5$). Це свідчить про те, що базова пряма стійка культиватора УСМК-5,4 забезпечує необхідну міцність при роботі з удосконаленою стрілкою лапою без зміни її конструкції.

4.7. Розрахунок тягово-енергетичних показників агрегату УСМК-5,4 з трактором ПМЗ-10280.

Тягово-енергетичні показники агрегату визначаємо на основі тягового опору однієї стрілкової лапи (п. 4.4) та кількості робочих секцій культиватора. Культиватор УСМК-5,4 у даній роботі розглядається для міжрядного обробітку цукрових буряків з міжряддям 45 см і має $z=12$ секцій. Тяговий опір однієї лапи становить:

- для ранньої фази ($h=0,06$ м):

$$R_{1,0,06} = 0,421 \dots 0,614 \text{ кН.}$$

- для пізньої фази $h=0,10$ м

$$R_{1,0,10} = 0,702 \dots 1,023 \text{ кН.}$$

Загальний тяговий опір культиватора визначаємо як суму опорів секцій

$$R_{\Sigma} = z \cdot R_1. \quad (4.9)$$

Для ранньої фази ($h=0,06$ м):

$$R_{\Sigma,0,06}^{\min} = 12 \cdot 0,421 = 5,05 \text{ кН.}$$

$$R_{\Sigma,0,06}^{\max} = 12 \cdot 0,614 = 7,37 \text{ кН.}$$

Для пізньої фази ($h=0,10$ м):

$$R_{\Sigma,0,10}^{\min} = 12 \cdot 0,702 = 8,42 \text{ кН.}$$

$$R_{\Sigma,0,06}^{\max} = 12 \cdot 1,023 = 12,28 \text{ кН.}$$

Потужність, необхідну для подолання тягового опору, визначаємо за формулою

$$N_{kp} = \frac{R_{\Sigma} \cdot V}{1000}. \quad (4.9)$$

де R_{Σ} – тяговий опір, кН;

V – швидкість руху, км/год.

Розрахунок виконуємо для робочої швидкості в межах 6...9 км/год.

Переведення швидкості $V_{\min} = 6$ км/год = 1,67 м/с, $V_{\max} = 9$ км/год = 2,50 м/с.

Для ранньої фази ($h = 0,06$ м) мінімальна потужність

$$N_{кр,0,06}^{\min} = \frac{5,05 \cdot 1,67}{1000} \cdot 1000 = 5,05 \cdot 1,67 = 8,43 \text{ кВт.}$$

Для ранньої фази ($h = 0,06$ м) максимальна потужність

$$N_{кр,0,06}^{\max} = 7,37 \cdot 2,50 = 18,43 \text{ кВт.}$$

Отже

$$N_{кр,0,06} = 8,4...18,4 \text{ кВт.}$$

Для пізньої фази ($h = 0,10$ м) мінімальна потужність

$$N_{кр,0,10}^{\min} = 8,42 \cdot 1,67 = 14,06 \text{ кВт,}$$

Для пізньої фази ($h = 0,10$ м) максимальна потужність

$$N_{кр,0,10}^{\max} = 12,28 \cdot 2,5 = 30,70 \text{ кВт,}$$

Отже

$$N_{кр,0,10} = 14,1...30,7 \text{ кВт.}$$

Номінальна потужність двигуна трактора ПМЗ-10280 становить $N_e = 80$ кВт.

З урахуванням ККД трансмісії (орієнтовно $\eta_{тр} = 0,80...0,85$) потужність, що може реалізовуватися на гаку

$$N_{дон} = \eta_{тр} \cdot N_e.$$

$$N_{дон} = (0,8...0,85) \cdot 80 = 64...68 \text{ кВт.}$$

Порівняння показує, що у всіх розрахункових режимах $N_{кр} < N_{дон}$, тобто трактор ПМЗ-10280 має достатній запас потужності для роботи з культиватором УСМК-5,4 при міжрядному обробітку цукрових буряків.

Для агрегату УСМК-5,4 (12 секцій) з удосконаленими стрілчастими лапами та трактором ПМЗ-10280 загальний тяговий опір становить при:

$$h = 0,06 \text{ м} - R_{\Sigma} = 5,05...7,37 \text{ кН};$$

$$h = 0,10 \text{ м} - R_{\Sigma} = 8,42...12,28 \text{ кН}.$$

Необхідна потужність на гаку трактора для швидкості 6...9 км/год становить при:

$$h = 0,06 \text{ м} - N_{кр} = 8,4...18,4 \text{ кВт};$$

$$h = 0,10 \text{ м} - N_{кр} = 14,1...30,7 \text{ кВт}.$$

Отримані значення свідчать, що агрегат забезпечує виконання технологічного процесу з необхідною робочою швидкістю, а тягово-енергетичних можливостей трактора ПМЗ-10280 достатньо для роботи в заданих умовах.

4.8. Висновки по розділу.

У розділі виконано конструкторсько-розрахункове обґрунтування параметрів удосконаленої стрілчастої лапи культиватора міжрядного обробітку цукрових буряків на базі серійної машини УСМК-5,4.

На основі агротехнічних вимог до міжрядного обробітку та фізико-механічних властивостей ґрунту прийнято вихідні дані для проектування. Розрахунок виконано для двох характерних глибин обробітку – 0,06 і 0,10 м, що відповідає ранній та пізній фазам розвитку рослин.

З використанням теоретичних залежностей, отриманих у розділі 3, обґрунтовано основні геометричні параметри стрілчастої лапи. Встановлено раціональне значення кута різання, яке забезпечує мінімальний тяговий опір при збереженні необхідної якості підрізання бур'янів, та кут розхилу крил, що обмежує переміщення ґрунту в захисну зону рядка. Визначено довжину крила лапи та кут загострення різальної кромки.

Виконаний розрахунок тягового опору показав, що для однієї лапи його значення становить:

- при глибині обробітку 0,06 м – 0,421...0,614 кН;
- при глибині обробітку 0,10 м – 0,702...1,023 кН.

Визначено навантаження на пряму стійку робочого органу. Максимальний згинальний момент у небезпечному перерізі становить 460 Н·м. Перевірочний розрахунок на міцність показав, що коефіцієнт запасу міцності дорівнює 1,25, що відповідає допустимим значенням для сільськогосподарських машин. Це свідчить про можливість використання базової стійки культиватора без зміни її конструкції.

Встановлено тягово-енергетичні показники агрегату у складі культиватора УСМК-5,4 та трактора ПМЗ-10280. Загальний тяговий опір культиватора становить:

- при глибині 0,06 м – 5,05...7,37 кН;
- при глибині 0,10 м – 8,42...12,28 кН.

Необхідна потужність на гаку трактора при робочій швидкості 6...9 км/год становить відповідно 8,4...18,4 кВт та 14,1...30,7 кВт, що значно менше допустимої потужності, яку може реалізувати трактор ПМЗ-10280. Отже, тягово-енергетичних можливостей трактора достатньо для роботи агрегату в заданих умовах. Таким чином, прийняті конструктивні параметри удосконаленої стрілкової лапи забезпечують виконання агротехнічних вимог до міжрядного обробітку цукрових буряків, зменшення енергоємності процесу та надійну роботу робочого органу без зміни конструкції базового культиватора.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Аналіз умов праці та аналіз небезпечних та шкідливих факторів, які можуть виникнути при експлуатації міжрядного культиватора.

Виконання технологічних операцій міжрядного обробітку просапних культур пов'язане з дією на працівників комплексу небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Основними з них є:

- рухомі частини машинно-тракторного агрегату (обертові вали, колеса, робочі органи культиватора);
- підвищений рівень шуму та вібрації в кабіні трактора;
- запиленість повітря робочої зони;
- вплив метеорологічних умов (висока температура, сонячна радіація, вітер);
- можливість травмування під час налагодження та технічного обслуговування стрілочастих лап і секцій культиватора.

Під час роботи удосконаленого культиватора зі стрілочастими лапами особливу небезпеку становлять операції регулювання глибини ходу, заміни робочих органів, очищення від рослинних решток та ґрунту. Тому система охорони праці повинна передбачати комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на зниження виробничого ризику.

Аналіз технологічного процесу дозволив виділити такі групи факторів:

Механічні небезпеки: контакт зі стрілочастими лапами, що мають гострі різальні кромки; наїзд або затягування людини рухомим агрегатом; відліт ґрунтових грудок і каміння під час роботи на підвищених швидкостях.

Фізичні фактори: шум від двигуна трактора 85–95 дБ; вібрація на робочому місці механізатора; підвищена запиленість повітря до 6–10 мг/м³.

5.2. Заходи щодо зниження виробничих ризиків, які можуть виникнути при експлуатації культиватора.

Для забезпечення безпечної експлуатації удосконаленого культиватора передбачаються такі заходи.

Організаційні: до роботи допускаються особи, які пройшли інструктаж з охорони праці та перевірку знань правил безпеки; розроблення інструкції з безпечної експлуатації культиватора зі стрілочастими лапами; заборона перебування сторонніх осіб у зоні роботи агрегату ближче 15 м; проведення щозмінного технічного огляду трактора і культиватора.

Технічні: конструкцією удосконаленого культиватора передбачені захисні кожухи на вузлах кріплення лап та регулювальних механізмах; застосування болтових з'єднань із самоконтрувальними гайками для запобігання самовідгвинчуванню; використання пружинних запобіжників від перевантаження стрілочасті лапи при наїзді на перешкоду; нанесення сигнального фарбування на крайки робочих органів; можливість регулювання глибини обробітку без перебування працівника під рамою машини.

5.3. Вимоги безпеки під час налагодження та обслуговування.

Усі роботи з монтажу та заміни стрілочастих лап виконувати лише при заглушеному двигуні та встановленому на стоянкове гальмо тракторі. Піднятий культиватор повинен бути зафіксований механічними упорами. Забороняється очищати лапи від ґрунту руками без використання спеціального інструменту. Затягування кріплень проводити динамометричним ключем згідно з технічною документацією. Після перших 2 годин роботи здійснювати контрольне підтягування болтових з'єднань.

5.4. Висновки по розділу.

Впровадження конструктивних удосконалень стрілочасті лапи та системи регулювання глибини дозволяє: зменшити кількість операцій ручного налагодження на 35–40 %, скоротити час перебування працівника в небезпечній зоні, знизити рівень травматизму під час технічного обслуговування, покращити умови праці механізатора за рахунок стабільності ходу культиватора та зменшення вібраційних навантажень.

6. ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності міжрядного обробітку просапних культур шляхом удосконалення конструкції культиватора та обґрунтування раціональних параметрів стрілчастої лапи.

У результаті аналізу сучасних конструкцій міжрядних культиваторів і робочих органів встановлено, що якість виконання технологічного процесу значною мірою визначається геометричними параметрами стрілчастих лап, які впливають на тяговий опір, повноту підрізання бур'янів, стабільність глибини обробітку та інтенсивність переміщення ґрунту в захисну зону рядка. Недостатня узгодженість цих параметрів з режимами роботи агрегату призводить до підвищених енерговитрат і погіршення агротехнічних показників.

Обґрунтовано напрям досліджень, який полягає в удосконаленні стрілчастої лапи культиватора УСМК-5,4 на основі теоретичного встановлення взаємозв'язку між її конструктивними параметрами, фізико-механічними властивостями ґрунту та показниками технологічного процесу міжрядного обробітку.

Розроблено фізичну модель взаємодії стрілчастої лапи з ґрунтом на основі рівноваги ґрунтового клина та отримано аналітичну залежність для визначення тягового опору з урахуванням геометричних параметрів лапи і властивостей ґрунтового середовища. Встановлено нелінійний характер зростання тягового опору зі збільшенням кута різання та визначено області раціональних параметрів робочого органу для різних фаз розвитку цукрових буряків.

Теоретично обґрунтовано вплив кута кришіння на інтенсивність бокового переміщення ґрунту та умову збереження захисної зони рядка. Показано, що раціональні геометричні параметри лапи повинні визначатися з урахуванням агротехнічних вимог та умов роботи, а формування і напрям

руху ґрунтового потоку по робочій поверхні є визначальними факторами зниження енергоємності процесу.

У конструкторсько-розрахунковій частині обґрунтовано основні параметри удосконаленої стрілчастої лапи. Виконано розрахунок її тягового опору для характерних глибин обробітку, визначено навантаження на стійку та перевірено її на міцність. Встановлено, що базова пряма стійка забезпечує необхідний коефіцієнт запасу міцності і може використовуватися без зміни конструкції.

Визначено тягово-енергетичні показники агрегату у складі культиватора УСМК-5,4 і трактора ПМЗ-10280. Показано, що необхідна потужність для виконання технологічного процесу є меншою за допустиму потужність, яку може реалізувати трактор, що підтверджує працездатність агрегату в заданих умовах.

Розроблено заходи з охорони праці під час експлуатації міжрядного культиватора, спрямовані на зменшення дії небезпечних і шкідливих виробничих факторів та забезпечення безпечних умов роботи.

Отримані результати підтверджують, що удосконалення конструкції стрілчастої лапи та обґрунтування її раціональних параметрів забезпечують зниження тягового опору, підвищення якості підрізання бур'янів, стабільність глибини обробітку та зменшення енергоємності міжрядного обробітку.

Таким чином, поставлена в роботі мета досягнута, а результати дослідження мають наукове і практичне значення та можуть бути використані при модернізації серійних міжрядних культиваторів і проектуванні нових робочих органів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Артеменко Д.Ю., Лузан П.Г., Лузан О.Р., Ковбаса В.П. Обґрунтування конструкції комбінованого наральника сошника просапної сівалки. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2025. Вип. 55. С. 121-133. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2025.55.121-133>.
2. Артиш В.І. Сучасний стан виробництва екологічно чистої продукції в країнах світу. Економіка АПК. 2005. № 3. С. 50-53.
3. Войтюк Д.Г., Барановський В.М., Булгаков В.М. та ін. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку. За ред. Д.Г. Войтюка. Київ: Вища освіта, 2005. 464 с.
4. Гапоненко В.С., Войтюк Д.Г. Сільськогосподарські машини. 6-е вид., перероб. і допов. Київ: Урожай, 1992. 448 с.
5. Зоря О.П. Сучасні аспекти підвищення ефективності виробництва плодоовочевої продукції. Вісник ХНТУСГ: Економічні науки. Вип. 71. Харків: ХНТУСГ, 2008. С. 154-162.
6. Комаристов В.Ю., Петренко М.М., Косінов М.М. Сільськогосподарські машини. Київ: Урожай, 1996. 240 с.
7. Кошук О.Б., Лузан П.Г., Мося І.А. та ін. Сільськогосподарські і меліоративні машини. Київ: ПІТО НАПН України, 2015. 291 с.
8. Лузан О.Р., Артеменко Д.Ю., Лузан П.Г., Кісільов Р.В. Теоретичний аналіз роботи сошника прямої сівби з адаптивними вертикальними дисками. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2025. Вип. 55. С. 238-249. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2025.55.238-249>.
9. Лузан О.Р., Артеменко Д.Ю., Лузан П.Г., Кісільов Р.В. Теоретичний аналіз роботи сошника прямої сівби з адаптивними вертикальними дисками. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2025. Вип. 55. С. 238-249. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2025.55.238-249>.

10. Лузан П.Г., Лузан О.Р. Напрями вдосконалення технічного забезпечення для раціонального використання земельних ресурсів. Раціональне використання ресурсів в умовах екологічно стабільних територій: колективна монографія. Полтава: ТОВ НВП «Укрпромторгсервіс», 2018. С.28-36.
11. Машина для сівби, садіння та догляду за посівами: навчальний посібник / В. Сало, С. Лещенко, П. Лузан, Л. Сало. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2022. 220 с.
12. Основи сталого розвитку аграрного сектора: Досвід та знання Франції, Чеської республіки, України. За заг. ред. Я. Сансебе, Т.М. Димань. Біла Церква: ТОВ «Офсет», 2010. 304 с.
13. Пристрій регулювання робочої глибини сошника посівної секції сівалки: пат. на корисну модель 138265 / Лузан П.Г., Сало В.М., Донець М.В., Лузан О.Р. Україна: МПК А01С 7/20 №и 2019 04643; заявл. 02.05.2019; опубл. 25.11.2019, Бюл. № 22. (Власник: Центральноукраїнський національний технічний університет).
14. Проектування сільськогосподарських машин. Навчальний посібник для виконання курсових проектів з розробки сільськогосподарської техніки при підготовці фахівців напряму 6.100202 «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва» / І.М. Бандера, А.В. Рудь, Я.В. Козій та ін. / за редакцією І.М. Бандери. Кам'янець-Подільський: ФОП Сисин О.В., 2011. 640 с.
15. Робочий орган культиватора: пат. 63319 Україна, МПК А01В 35/00. / Сисолін П.В., Сало В.М., Лузан П.Г., Сисоліна І.П., Мачок Ю.В.; заявник і патентовласник Кіровоград. нац. техн. ун-т.- № и 2011 01586; заявл. 11.02.2011; опубл. 10.10.2011. Бюл. №19.
16. Робочий орган культиватора: пат. на корисну модель 116992 Україна, МПК А01В 35/00. / Лузан П.Г., Дідур О.В., Лузан О.Р., Грінчук А.Є.; заявник і патентовласник Кіровоград. нац. техн. ун-т.- № и 2016013576; заявл. 29.12.2016; опубл. 12.06.2017, Бюл. №11.

17. Сало В., Лещенко С., Лузан П., Сало Л. Машины для сівби, садіння та догляду за посівами: навчальний посібник. Кропивницький: Видав. Лисенко В.Ф., 2022. 220 с.
18. Сало В.М., Вовнянко Б.Г., Лещенко С.М., Лузан П.Г. Покращення якісних показників процесу сівби. Сільськогосподарські машини, 2024. Вип. 50, С. 113-119. DOI: <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1398>.
19. Сало В.М., Лузан П.Г., Вовнянко Б.Г. Технічне рішення покращення якості процесів сівби. The XXII International Scientific and Practical Conference «Methodology and organization of scientific research», June 03-05, 2024, Berlin, Germany. Р. 26-29. URL: <https://eu-conf.com/en/events/methodology-and-organization-of-scientific-research/>.
20. Сошник / Артеменко Д.Ю., Онопа В. А., Лузан П.Г., Мачок Ю.В., Муленко К.А. / пат. на корисну модель 161657 Україна: МПК А01С7/20 №u 2025 01031; заявл. 10.03.2026; опубл. 24.12.2025, Бюл.№ 52.
21. Сошник / Цимбал А.Г., Артеменко Д.Ю., Лузан П.Г., Онопа В. А., Мачок Ю.В., Богатирьов Д.В. / пат. на корисну модель 159673 Україна: МПК А01С7/20 № u202401264; заявл. 11.03.2024; опубл. 25.06.2025, Бюл.№ 26.
22. Теорія сільськогосподарських машин. Том 1, частина 2. Машины для сівби та садіння. Харків: Око, 2002. 452 с.
23. Шмат С.І., Лузан П.Г. Ресурсозберігаючі технології вирощування сільськогосподарських культур. Механізація та електрифікація сільського господарства: Міжвідомчий тематичний наук. зб. Глеваха: ННЦ “ІМЕСГ”, 2010. Вип. 94. С. 126-133.
24. Шмат С.І., Лузан П.Г., Колісник С.В. Ресурсозберігаючі технології вирощування сільськогосподарських культур. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць. Кіровоград: 2010, Вип. 23, С. 303-309.

Додатки