МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
«___»_____ 2026 р.
Зав. кафедри _д.т.н., професор___
(науковий ступінь, вчене звання)
_____ __Володимир ДІДУР___
(підпис) (ініціали, прізвище)

Кваліфікаційна робота (дипломний проект)

перший (бакалаврський)
(назва освітнього рівня)

тема проекту: «Кінематичний та силовий аналіз комбінованих робочих органів для технології Strip-Till з функцією різнорівневого внесення добрив»

Виконав: студент 3 курсу, групи 31к-ім
освітньої програми __бакалавра_____
спеціальності _208 «Агроінженерія»__
Олег СЛОНЬ
(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н., доцент Іван ЛІСОВИЙ___
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Умань – 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти
Кафедра агроінженерії
Освітня програма «Бакалавр»
Спеціальність 208 «Агроінженерія»
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри
_____ Володимир ДІДУР
«___» _____ 2026 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ)

СЛОНЮ Олегу Миколайовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Кінематичний та силовий аналіз комбінованих робочих органів для технології Strip-Till з функцією різнорівневого внесення добрив»
керівник роботи Лісовий І.О., к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від
" 08 " травня 2026 р. № 01-06/167
2. Строк подання студентом роботи 20.05.2026 р.
3. Вихідні дані до роботи: Вітчизняні та зарубіжні науково-технічні джерела із землеробської механіки, монографії та періодичні видання з питань смугового обробітку ґрунту, результати аналітичного, кінематичного та силового моделювання взаємодії дискових і зубових робочих органів із ґрунтовим масивом і рослинними рештками, нормативно-довідкові дані про фізико-механічні властивості й питомий статичний опір ґрунтів, а також технічна документація на серійні просапні культиватори типу КРН та пневматичні системи транспортування й диференційованого дозування мінеральних добрив.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
Вступ; аналітичне обґрунтування дослідження процесу смугового обробітку ґрунту та локального підживлення; конструкторсько-технологічне обґрунтування, кінематичний та силовий аналіз комбінованих робочих органів; охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях при експлуатації смугових ґрунтообробних агрегатів; техніко-економічна ефективність впровадження розроблених технічних рішень; загальні висновки; список використаних джерел; додатки.
5. Ілюстративний матеріал: підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 10 слайдів) як додаток до доповіді за темою дипломної роботи

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Едуард ПРОКОПЕНКО, доцент		

7. Дата видачі завдання 1 жовтня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При-мітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу.	01.12.2025 р.	
2.	Розробка та оформлення матеріалів розділу 1 «Аналітичне обґрунтування дослідження процесу смугового обробітку ґрунту та локального підживлення».	25.12.2025 р.	
3.	Розробка та оформлення матеріалів розділу 2 «Конструкторсько-технологічне обґрунтування, кінематичний та силовий аналіз комбінованих робочих органів».	02.02.2026 р.	
4.	Розробка та оформлення матеріалів розділу 3 «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях при експлуатації смугових ґрунтообробних агрегатів».	01.04.2026 р.	
5.	Розробка та оформлення матеріалів розділу 4 «Техніко-економічна ефективність впровадження розроблених технічних рішень».	01.05.2026 р.	
6.	Виконання ілюстративної частини роботи (підготовка конструкторських креслень секції, графіків та оформлення додатків).	12.05.2026 р.	
7	Представлення роботи керівнику на перевірку, формування загальних висновків та остаточне оформлення пояснювальної записки зі списком використаних джерел.	20.05.2026р.	

Студент _____ Олег СЛОНЬ
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Іван ЛІСОВИЙ
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП 6

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СМУГОВОГО ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ ТА ЛОКАЛЬНОГО ПІДЖИВЛЕННЯ 7

1.1. Агротехнічні особливості та тенденції розвитку технології Strip-Till 6

1.2. Порівняльний аналіз конструктивно-технологічних схем комбінованих робочих органів для смугового розпушування та розчищення рядків 9

1.3. Огляд існуючих технічних рішень та систем для реалізації функції різнорівневого розподілу мінеральних добрив у кореневмісному шарі 11

1.4. Обґрунтування концепції модернізації серійного просапного культиватора, визначення мети та інженерних завдань проекту 13

Висновки до розділу 16

РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ, КІНЕМАТИЧНИЙ ТА СИЛОВИЙ АНАЛІЗ КОМБІНОВАНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ 17

2.1. Розробка та опис принципу роботи запропонованої комбінованої секції для смугового обробітку ґрунту та диференційованого підживлення 17

2.2. Кінематичний аналіз взаємодії дискових робочих органів та очисників рядка з ґрунтовим профілем і рослинними рештками 19

2.3. Силовий аналіз розпушувальної лапи-направлювача та визначення її загального тягового опору за різних швидкісних режимів 21

2.4. Математичне моделювання процесу енергоємності смугового обробітку та параметричне обґрунтування пристроїв різнорівневої подачі туків 23

2.5. Розрахунок елементів конструкції комбінованого робочого органу (стійки, кріплень, паралелограмного механізму) на міцність та жорсткість 26

Висновки до розділу 28

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СМУГОВИХ ҐРУНТООБРОБНИХ АГРЕГАТІВ 30

3.1. Комплексний аналіз умов праці та потенційних небезпечних виробничих факторів під час обслуговування комбінованих Strip-Till машин 30
3.2. Інженерно-технічні заходи щодо забезпечення безпеки експлуатації туковисівних систем та пневмо-транспортних магістралей добрив 31
3.3. Моделювання сценаріїв небезпечних ситуацій під час роботи комбінованих робочих органів та систем підживлення під час забивання чи наїзду на перешкоди 32
Висновки до розділу 33
РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ 34
4.1. Розрахунок капітальних витрат на виготовлення, модернізацію та інтеграцію комбінованих робочих органів на раму серійного культиватора 34
4.2. Визначення операційних та експлуатаційних витрат при виконанні технологічного процесу смугового обробітку з одночасним підживленням 35
4.3. Оцінка економічного ефекту від зниження енерговитрат, підвищення врожайності та розрахунок терміну окупності модернізованого агрегату 37
Висновки до розділу 38
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 39
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 41
ДОДАТКИ 46

ВСТУП

Актуальність теми. Посилення дефіциту вологи та деградація структури орного шару в Україні зумовлюють перехід до вологоощадної технології Strip-Till, яка оптимізує агрофізичний стан ґрунту в зоні рядка при збереженні мульчі в міжряддях [5, 20]. Ефективне управління мінеральним живленням за умов гідротермічного стресу потребує локального пошарового депонування туків під вісь посіву на глибину залягання активної кореневої системи [14, 22].

Широке впровадження технології стримується високою капіталомісткістю імпортних комплексів та їх забиванням на важких високостеблових агрофонах [9, 25]. Вирішення цієї інженерної проблеми полягає в розробці модульних комбінованих робочих органів для інтеграції на рами серійних культиваторів [1]. Це вимагає дослідження взаємодії в системі «ґрунт–робочий орган» для зниження тягового опору при підвищених швидкостях руху Vm [16, 27], а також обґрунтування геометрії протиблокувальних пристроїв та аеродинаміки двоканальних систем розподілу добрив [11, 32].

Об'єкт дослідження – технологічний процес взаємодії комбінованих робочих органів смугового модуля (прорізного колтера, дискових очисників, глибокорозпушувальної стійки та пристрою пошарового закладання туків) із трифазним ґрунтовим середовищем і стебловими рештками попередника в межах єдиного технологічного циклу.

Предмет дослідження – закономірності функціональних зв'язків між конструктивно-геометричними параметрами, кінематичними режимами роботи елементів секції (λc, λrc), аеродинамічними характеристиками пневмотранспортної магістралі та показниками загального тягового опору (Rsh), питомої енергоємності (est) і міцнісної надійності металоконструкції модернізованої машини [4, 6].

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СМУГОВОГО ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ ТА ЛОКАЛЬНОГО ПІДЖИВЛЕННЯ

1.1. Агротехнічні особливості та тенденції розвитку технології Strip-Till

Суть смугової системи землеробства полягає в просторово-диференційованому впливі на орний шар, що передбачає інтенсивне механічне розпушування технологічної зони майбутнього рядка при одночасному збереженні мульчувального покриву з пожнивних решток у міжряддях [8, 20]. Такий підхід забезпечує агрономічно виправданий компроміс між суцільним класичним розпушуванням та нульовим обробітком (No-Till), оптимізуючи водно-фізичні властивості та структуру насіннєвого ложа [20]. Конструктивно-технологічна схема поперечного профілю обробленої смуги з локалізацією пожнивних решток наведена на рисунку А.1 (Додаток А).

Геометричні параметри сформованої смуги визначаються біологічними особливостями архітектоніки кореневої системи культури та типом взаємодіючих робочих органів культиватора [17]. Ширина зони деформації становить $B_{st} = 0,15...0,25$ м, а глибина вертикального крошіння глибокорозпушувальною стійкою становить Hst = 0,20...0,35$ м [8, 21]. Питомий об'єм механічно порушеного ґрунтового масиву на одиницю площі агрофітоценозу розраховується за залежністю:

$$V_s = 10^4 \cdot \frac{B_{st} \cdot H_{st}}{B_{mr}} \tag{1.1}$$

де Vs – питомий об'єм деформованого ґрунту на одному гектарі поля, м^{3}га; Bst – конструктивна ширина обробленої смуги, м; Hst – глибина технологічного розпушування ґрунту, м; Bmr – ширина міжряддя просапної культури, м.

Використання мульчувального шару в міжряддях дозволяє суттєво підвищити ерозійну стійкість поверхні поля та мінімізувати капілярне

випаровування продуктивної вологи [21]. Порівняльні агротехнічні показники стану орного шару для різних технологічних систем наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз агротехнічних показників стану ґрунту

Фізико-механічні параметри ґрунтового середовища	**Традиційна система (полицева оранка)**	**Нульовий обробіток (No-Till)**	**Смуговий обробіток (Strip-Till)**
Щільність складення в зоні рядка, г/см^3	1,10...1,25 [4]	1,35...1,45 [20]	1,15...1,22 [4]
Збереження продуктивної вологи в шарі 0–30 см, %	40...50 [21]	85...90 [20]	75...80 [8]
Коефіцієнт покриття поверхні пожнивними рештками, %	0...5 [21]	85...95 [20]	55...65 [20]
Температура ґрунту в зоні висіву навесні, °С	12...14 [20]	8...10 [20]	11...13 [20]

Завдяки видаленню рослинних решток із зони смуги за допомогою дискових чи пальцевих очисників, температура насіннєвого ложа навесні є на 3...5 °С вищою порівняно з No-Till, що прискорює появу сходів кукурудзи та соняшнику [20].

Сучасні тенденції розвитку конструкцій машин для реалізації Strip-Till свідчать про інтенсивне впровадження комбінованих однопрохідних робочих органів, які одночасно здійснюють підрізання рослинних решток, розпушування та локальне підживлення [1, 6]. Важливим інженерно-технічним трендом є розробка пасивних та активних протиблокувальних пристроїв секцій, що забезпечують безперебійну роботу на полях із великою кількістю стебел кукурудзи [10, 28, 33]. Основним вектором розвитку технології є впровадження систем зонального різнорівневого депонування мінеральних добрив відповідно до концепції "4R" підживлення [12, 22]. Туки вносяться безпосередньо під вісь майбутнього рядка на два горизонти: стартовий на глибину h_1 = 0,10...0,12 м та основний на глибину h2 = 0,20...0,25 м, що стимулює розвиток кореневої системи

у глибокі зволожені шари та підвищує коефіцієнт засвоєння азоту й фосфору [24, 31]. Для реалізації цього потенціалу критичним є забезпечення точності руху посівного агрегату по центру сформованої смуги, оскільки відхилення понад 0,10...0,20 м призводить до суттєвого недобору врожаю через просторову ізоляцію коріння від тукових депо [7].

1.2. Порівняльний аналіз конструктивно-технологічних схем комбінованих робочих органів для смугового розпушування та розчищення рядків

Якість підготовки насіннєвого ложа за технологією Strip-Till визначається параметрами взаємодії та взаємним просторовим розташуванням елементів у складі комбінованої секції [18]. Базова конструктивна компоновка секції передбачає послідовне розміщення вздовж поздовжньої осі агрегату таких функціональних елементів: переднього прорізного диска (колтера), парних дискових очисників рядка від пожнивних решток, глибокорозпушувальної стійки (ножа), бокових сферичних дисків для утримання деформованого ґрунтового масиву та притискного котка [17, 21]. Кінематична схема взаємодії зазначених елементів у межах єдиного модуля наведена на рисунку А.2 (Додаток А).

Головним параметром кінематичного режиму роботи пасивних дискових очисників рядка є безрозмірний коефіцієнт λ, який визначає співвідношення лінійної швидкості точок леза до швидкості руху агрегату і розраховується за залежністю:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot d}{2 \cdot V_m} \tag{1.2}$$

де λ – коефіцієнт кінематичного режиму роботи очисного диска; ω– кутова швидкість обертання диска навколо власної осі, рад/с; d – зовнішній діаметр

очисного диска по вершинах зубців, м; Vm – поступальна швидкість руху ґрунтообробної машини, м/с.

Світова інженерна практика проектування робочих органів поділяє їх на пасивні глибокорозпушувальні системи та активні фрезерні модулі [22]. Північноамериканська школа машинобудування (Schlagel Rapid-Till, Orthman) базується на пасивних швидкісних секціях, розрахованих на роботу в швидкісному діапазоні 9...12 км/год [3, 12]. Для запобігання забиванню секцій на високостеблових агрофонах кукурудзи конструкції оснащують похилими, конічними або динамічно компенсованими протиблокувальними пристроями, які примусово відводять рослинні залишки в міжряддя [2, 5, 6].

Європейські та турецькі виробники (зокрема фрезерні системи рядкових ротаційних сап) застосовують активні робочі органи із С-подібними ножами [23]. При частоті обертання ротора 370 об/хв та поступальній швидкості 5,4 км/год зміна ширини фрезерування смуги з 22,5 см до 37,5 см забезпечує інтенсивне кришіння ґрунту, але спричиняє підвищене випаровування капілярної вологи [23]. Формування фінішної берми та подрібнення грудок здійснюється секційними розрізними котками, використання яких забезпечує підвищення температури насіннєвого ложа на 1,2...1,4 °С порівняно з необробленим полем [21, 24]. Порівняльні характеристики основних конструктивно-технологічних схем наведено в таблиці 1.2.

Стабілізація ходу розпушувального ножа у вертикальній площині на щільних ґрунтах із високим питомим опором досягається інтеграцією масивних паралелограмних підвісок із пружинними або гідравлічними демпферами (характерно для техніки ТОВ «ВЕЛЕС-АГРО ЛТД.») [2, 4]. Бокові сферичні диски, встановлені за розпушувальною стійкою, обмежують траєкторію відкидання часток ґрунту, фіксуючи поперечні межі обробленої смуги [6]. Стабільність руху всієї механічної системи забезпечується оптимізацією поздовжньої відстані між точкою контакту колтера та носком глибокорозпушувача, що виключає утворення внутрішніх зон надмірного ущільнення ґрунту [4, 18].

Таблиця 1.2 – Порівняльний аналіз конструктивно-технологічних схем робочих органів

Тип конструктивно-технологічної схеми секції	**Склад функціональних елементів**	**Технічні переваги схеми**	**Обмеження експлуатації**
Пасивна глибокорозпушувальна схема з катком-кошиком [12, 21]	Прорізний колтер, очисні диски, стійка-ніж, розрізний пружинний коток	Низька металоємність, стабільна робота на швидкостях понад 9 км/год	Незадовільне крошіння брил на сухих важких глинистих ґрунтах
Схема з активним ротаційним робочим органом [23]	Роторний вал із С-подібними ножами, притискні щитки	Висока якість подрібнення ґрунтового профілю за один прохід	Підвищена енергоємність процесу, значні втрати ґрунтової вологи
Схема з косоніжковим протиблокувальним пристроєм [2, 6]	Похилі диски-очисники, стійка, бокові утримуючі диски	Безперебійна робота на полях із високим фоном залишків кукурудзи	Складність кінематичних регулювань кутів атаки дисків

На основі аналізу існуючих рішень для умов змінного зволоження України доцільним є використання схеми з пасивними регульованими дисковими очисниками та глибокорозпушувальною стійкою з боковими формотворчими елементами [1, 6].

1.3. Огляд існуючих технічних рішень та систем для реалізації функції різнорівневого розподілу мінеральних добрив у кореневмісному шарі

Міжнародний досвід застосування технології Strip-Till показує, що ефективність засвоєння поживних речовин рослинами різко зростає при переході від поверхневого розкидного внесення до локального внутрішньоґрунтового депонування туків [25, 27]. Згідно з концепцією «4R» надходження поживних речовин (правильне джерело, правильна норма, правильний час, правильне місце), сучасні смугові агрегати європейських та американських виробників

інтегрують у свою конструкцію високоточні системи диференційованого розподілу добрив [26, 32]. Це дозволяє створювати насичені вертикальні зони (депо) живлення безпосередньо під вісь майбутнього рядка, мінімізуючи втрати діючої речовини [12, 28].

Технологічний процес подачі туків кожною робочою секцією характеризується масовою витратою матеріалу, яка залежить від кінематичних параметрів руху та заданої дози внесення. Секундна витрата мінеральних добрив розраховується за формулою:

$$q_f = \frac{Q_{ha} \cdot B_{mr} \cdot V_m}{10^4} \tag{1.3}$$

де qf – секундна витрата мінеральних добрив однією секцією культиватора, кг/с; Qha – задана норма внесення туків на одиницю площі поля, кг/га; Bmr – ширина міжряддя просапної культури, м; Vm – поступальна швидкість руху комбінованого агрегату, м/с.

Дослідження показують, що заглиблення точки подачі азотовмісних добрив до 0,25 м дозволяє знизити інтенсивність газоподібних втрат аміаку (NH_3) та оксиду азоту (N_2O) у 2...3 рази порівняно з дрібним закладанням на 0,05 м, що одночасно підвищує коефіцієнт використання азоту на \$38,3\%\$ [28]. Окрім сухих гранульованих форм, у передовій практиці США та КНР активно впроваджується стрічкове інжекційне внесення рідких комплексних добрив під тиском за допомогою спеціальних трубчасті сошників, закріплених на глибокорозпушувальних стійках [29, 30]. Порівняльний аналіз основних конструктивно-технологічних систем розподілу добрив, які використовуються у світовому сільськогосподарському машинобудуванні, наведено в таблиці 1.3.

Застосування двоканальних систем із спліт-черевиками забезпечує динамічне розділення потоку добрив у співвідношенні, як правило, 1:2 між верхнім (стартовим) та нижнім (основним) горизонтами, що гарантує безперервне живлення просапних культур протягом усього періоду вегетації [6, 31].

Таблиця 1.3 – Порівняльний аналіз конструктивно-технологічних систем розподілу добрив

Конструктивно-технологічна система розподілу	**Параметри закладання туків за глибиною профілю**	**Ефективність використання діючої речовини в умовах посухи**
Однорівнева стрічкова система (на базі ножових сошників)	Один фіксований рівень (15...18 см) від поверхні поля	Середня (обмежений доступ до поживних речовин на початкових етапах розвитку) [1, 26]
Двоканальна пневматична система (зі спліт-черевиком стійки)	Два фіксовані рівні (10...12 см та 20...25 см) синхронно	Висока (реалізація концепції «4R» для стартового та базового живлення) [6, 12]
Інжекційна система рідкого пошарового підживлення	Локальні гнізда або стрічки (12...20 см) під тиском	Максимальна (миттєва дифузія іонів до коріння за умов дефіциту опадів) [23, 30]

Використання рідких форм добрив при глибокому смуговому закладанні покращує параметри архітектоніки кореневої системи на ранніх стадіях розвитку, збільшуючи кількість продуктивних капілярних корінців у зволожених горизонтах [29]. Таким чином, інженерно-технічний розвиток систем підживлення спрямований на створення багатоканальних робочих органів, здатних адаптувати глибину депонування добрив до поточного гідротермічного стану ґрунтового профілю [24, 28].

1.4. Обґрунтування концепції модернізації серійного просапного культиватора, визначення мети та інженерних завдань проекту

Широке впровадження технології Strip-Till стримується високою капіталомісткістю спеціалізованих імпортних смугових агрегатів, що робить економічно доцільним розробку концепції модернізації наявного в господарствах парку серійних просапних культиваторів [1, 4]. Серійні машини для міжрядного обробітку (наприклад, КРН-5,6 або УСМК-5,4) мають просторові рами високої жорсткості, які можуть слугувати базовою тривальною основою для інтеграції важких комбінованих робочих секцій [1, 27].

Технічна суть пропонованої модернізації полягає у повній заміні штатних легких секцій для поверхневого обробітку (4...12 см) на посилені багатофункціональні модулі Strip-Till. Замість традиційних стрільчастих лап і бритв на раму базового культиватора встановлюються індивідуальні паралелограмні підвіски з потужними пружинними блоками довантаження. Нова секція послідовно об'єднує прорізний колтер для розрізання мульчі, парні зубчасті очисники рядка, глибокорозпушувальну стійку (до 35 см) з інтегрованим двоканальним тукопроводом та фінішний коток. Це дозволяє зберегти дорогу тривальну раму та ходову частину серійного культиватора, але повністю змінити його технологічне призначення. Конструктивно-технологічна схема переобладнання базового бруса серійного культиватора шляхом інтеграції комбінованих модулів наведена на рисунку (Додаток).

При переобладнанні тривальних конструкцій серійних машин необхідно враховувати динамічне зростання тягового опору та вертикальних зусиль, що виникають внаслідок взаємодії заглиблених робочих органів із твердим ґрунтовим масивом [13, 21]. Загальний тяговий опір модернізованого ґрунтообробно-підживлювального агрегату Ra визначається за аналітичною залежністю:

$$R_a = n \cdot (R_c + R_{rc} + R_{sh}) + G_a \cdot f \tag{1.4}$$

де Ra – загальний тяговий опір модернізованого агрегату, кН; n – кількість модернізованих робочих секцій, встановлених на рамі, шт.; Rc – тяговий опір дискового колтера при прорізанні решткiв, кН; Rrc – опір парних дискових очисників рядка, кН; Rsh – тяговий опір глибокорозпушувальної лапи з туковим черевиком, кН; Ga – повна вага модернізованого агрегату з урахуванням маси завантажених тукових бункерів, кН; f – коефіцієнт опору перекочуванню опорно-приводних коліс культиватора.

Вихідні інженерно-технічні вимоги та граничні параметри, що покладені в основу розробки та розрахунку елементів модернізації, наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Техніко-технологічні вимоги до модернізованого агрегату

Технологічні та конструктивні параметри	**Очікуване значення показника**	**Агротехнічне обґрунтування параметра**
Глибина ходу глибоко–розпушувальної стійки, см	20...35	Руйнування плужної підошви та аерація [8, 21]
Ширина обробленої робочої смуги ґрунту, см	15...25	Створення оптимального насіннєвого ложа [8, 20]
Кількість рівнів вертика–льного закладання туків	2	Забезпечення пошарового живлення рослин [6, 12]
Робочий швидкісний режим руху агрегату, км/год	8...12	Створення відцентрового ефекту очисних дисків [3, 10]

Аналіз граничних параметрів, наведених в таблиці 1.4, дозволяє чітко сформулювати вектор проектування комбінованої секції, де ключовим завданням є стабілізація заданих глибин обробітку та дозування туків у динамічних умовах експлуатації [4, 25].

Метою проекту є підвищення ефективності вирощування просапних наук в умовах кліматичних змін України шляхом обґрунтування кінематичних і геометричних параметрів комбінованих робочих органів для смугового обробітку ґрунту та локального пошарового внесення добрив.

Для досягнення поставленої мети визначено **такі інженерні завдання проекту:**

Розробити просторову та конструктивно-технологічну схему комбінованого робочого органу Strip-Till з індивідуальною паралелограмною підвіскою та пружинним демпфером захисту стійки [6, 27].

Провести кінематичний аналіз взаємодії дискових очисників рядка з рослинними рештками для обґрунтування оптимальних кутів атаки та виключення ефекту забивання [28, 34].

Виконати силовий аналіз глибокорозпушувальної стійки з метою оптимізації кута різання, геометричної форми долота та зниження загального тягового опору секції [4, 21].

Обґрунтувати конструктивні параметри двоканального тукового черевика для забезпечення рівномірного пошарового розподілу мінеральних добрив по заданих горизонтах кореневмісного шару [12, 31].

Висновки до розділу

Технологія Strip-Till забезпечує оптимальну щільність ґрунту в зоні рядка (1,15...1,22 г/см^3) та збереження 75...80% продуктивної вологи, усуваючи ризики надмірного ущільнення й переохолодження насіннєвого ложа [4, 8, 20].

Реалізація концепції «4R» шляхом пошарового закладання туків на горизонти 0,10...0,12 м та 0,20...0,25 м знижує газоподібні втрати азоту у 2...3 рази та підвищує ефективність використання діючої речовини у посуху на 38,3% [24, 28].

Конструктивно оптимальними є пасивні глибокорозпушувальні модулі з паралелограмною підвіскою, де якість розчищення технологічної смуги лімітується безрозмірним коефіцієнтом кінематичного режиму роботи дисків λ [6, 21, 23].

Обґрунтовано переобладнання жорстких рам серійних культиваторів (КРН-5,6, УСМК-5,4) під важкі Strip-Till секції, причому загальний тяговий опір Ra лінійно залежить від кількості встановлених модулів [1, 4, 13].

РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ, КІНЕМАТИЧНИЙ ТА СИЛОВИЙ АНАЛІЗ КОМБІНОВАНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ

2.1. Розробка та опис принципу роботи запропонованої комбінованої секції для смугового обробітку ґрунту та диференційованого підживлення

Конструктивна розробка запропонованої комбінованої секції базується на модульній архітектурі з індивідуальним копіюванням рельєфу поля за допомогою паралелограмного механізму, що забезпечує стабільність просторового положення робочих органів у динамічних умовах роботи [6, 27]. Послідовне технологічне компонування елементів у межах однієї секції дозволяє реалізувати повний цикл смугового обробітку та дворангового закладання туків за один прохід агрегату [17]. Просторова схема розташування функціональних вузлів розробленого робочого модуля наведена на рисунку (Додаток).

Запропонована секція функціонує таким чином: під час поступального руху агрегату попереду секції йде прорізний дисковий колтер, який здійснює вертикальне розділення маси пожнивних решток та часткове надрізання верхнього шару ґрунту, запобігаючи забиванню наступних робочих органів [10]. Слідом за колтером парні пасивні зірчасті очисники рядка розсувають зрізані рослинні рештки в обидва боки, формуючи чисту від мульчі смугу [28]. Очищеною смугою рухається глибокорозпушувальна стійка паравекторного типу, яка здійснює об'ємне сколювання та крошіння ґрунтового масиву [3, 21]. Завдяки інтегрованому двоканальному туковому черевику, закріпленому на тильній частині стійки, здійснюється диференційована пневматична подача мінеральних добрив: нижній потік закладається на глибину максимального ходу лапи, а верхній – у середню частину обробленого профілю [6, 23]. Сферичні диски, що йдуть за стійкою, обмежують розліт деформованого ґрунту, повертають його в межі смуги та формують розпушену насіннєву берму [2, 29]. Пружинно-притискний коток-кошик завершує процес, подрібнюючи великі грудки та ущільнюючи поверхневий шар для мінімізації втрат вологи [4].

Для запобігання заклинюванню та забиванню міждискового простору ґрунтово-рослинною масою, поздовжній зсув між точкою контакту колтера та носком глибокорозпушувача обґрунтовано з урахуванням кута сколювання ґрунту за залежністю [4, 18]:

$$L_{off} = H_{sh} \cdot \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) + \delta_s \tag{2.1}$$

де Loff – поздовжня відстань між віссю прорізного колтера та носком глибокорозпушувальної лапи, м; Hsh – максимальна технологічна глибина ходу глибокорозпушувальної стійки, м; φ– кут внутрішнього тертя ґрунтового масиву, град; δs – конструктивний лінійний зазор для забезпечення динамічної стійкості потоку ґрунту, м.

Усі геометричні характеристики та діапазони технологічних регулювань елементів розробленої комбінованої секції зведені в єдину систему параметрів, яку наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Геометричні та технологічні параметри елементів комбінованої секції

Назва конструктивного вузла секції	**Тип робочого елемента та його кінематичні особливості**	**Регульовані параметри та робочі діапазони**
Прорізний диск (колтер)	Хвилястий пасивний диск із жорстким пружинним демпфуванням	Діаметр Dc = 0,46 м; глибина ходу 5...8 см
Очисник рядка від решткiв	Парні зірчасті диски з можли-вістю копіювання рельєфу [28]	Діаметр Drc = 0,36 м; кут атаки 12...18°
Глибокорозпушувач	Пряма стійка зі змінним долотом та туковим випуском [6]	Глибина Hsh = 20...35 см; кут різання 22...25°
Формотворчі бокові диски	Парні увігнуті сферичні диски на індивідуальних осях	Діаметр Dd = 0,32 м; кут нахилу до вертикалі 5...10°
Фінішний коток	Гратчастий (планчастий) цилінд–ричний коток-кошик [2, 29]	Діаметр Dk = 0,30 м; питоме притискне зусилля до 0,5 кН

Описана схема взаємодії робочих елементів дозволяє знизити сумарний тяговий опір модернізованого агрегату завдяки раціональному використанню зон попереднього ослаблення напружень у ґрунтовому масиві, що створюються послідовно йдучими дисковими органами [4, 18].

2.2. Кінематичний аналіз взаємодії дискових робочих органів та очисників рядка з ґрунтовим профілем і рослинними рештками

Технологічний процес функціонування дискових робочих органів комбінованої секції включає послідовну взаємодію прорізного колтера та парних зірчастих очисників рядка з трифазним ґрунтовим середовищем і стебловими рештками попередника [10, 21]. Кінематика пасивного прорізного диска визначається його перекочуванням по щільному агрофону, за якого під дією вертикального навантаження відбувається впровадження леза в ґрунт та перерізання рослинних волокон [13]. Абсолютний рух будь-якої точки, розташованої на різальній кромці колтера або зубі очисника, є результатом додавання поступального руху агрегату та обертального руху диска навколо власної осі [28]. Для забезпечення якісного безупинного різання рослинних решток без їх зсуву та згрібання попереду диска, абсолютна швидкість точки контакту леза повинна мати чітко визначену спрямованість [21]. Модуль абсолютної швидкості робочої точки на периферії диска описується математичною залежністю:

$$V_a = V_m \cdot \sqrt{1 + \lambda^2 - 2 \cdot \lambda \cdot \cos \alpha_{at}} \tag{2.2}$$

де Va – абсолютна швидкість розглянутої точки на периферійній кромці дискового органу, м/с; Vm – поступальна швидкість руху ґрунтообробного агрегату, м/с; λ – кінематичний режим роботи дискового робочого органу; αat – кут повороту радіуса розглянутої точки відносно вертикальної осі, рад.

Характер кінематичної взаємодії дискових систем та очисників рядка із шаром рослинних решток безпосередньо впливає на якість підготовки смуги. Кінематична схема та просторова траєкторія руху характерних точок робочих органів представлені на рисунку (Додаток).

Аналіз траєкторії руху периферійної точки пасивного зірчастого очисника рядка показує, що вона описує подовжену циклоїду [28, 33]. Для ефективного відведення рослинних решток за межі смуги Bst без підтягування їх під наступну глибокорозпушувальну стійку, зуби очисника повинні взаємодіяти з масою в зоні висхідної гілки траєкторії [34]. Рівняння руху робочої точки зуба очисника за координатною віссю поступального руху має такий аналітичний вигляд:

$$X_M = V_m \cdot t + R_{rc} \cdot \cos(\omega_{rc} \cdot t) \tag{2.3}$$

де X_M – горизонтальна координата траєкторії руху робочої точки очисника, м; t – поточний час кінематичної взаємодії, с; Rrc – максимальний конструктивний радіус зірчастого диска очисника рядка, м; ω_{rc} – кутова швидкість обертання очисного диска навколо власної осі, рад/с.

Динамічна стабільність кутової швидкості ω_{rc} пасивного очисника залежить від сили зчеплення його елементів із ґрунтовим профілем та кута атаки диска до напрямку руху агрегату [10, 32]. На підставі проведених теоретичних розрахунків та моделювання кінематичних режимів у системі керування рухом визначено граничні параметри кінематики робочих органів, які наведено в таблиці 2.2.

Збільшення поступальної швидкості Vm понад встановлені межі призводить до порушення стабільності копіювання рельєфу паралелограмною підвіскою, внаслідок чого виникає кінематичний зсув зон обробітку та знижується якість очищення насіннєвого ложа [4, 18]. Оптимальне співвідношення між геометричними параметрами зубів очисника та кутом атаки αa дозволяє мінімізувати ефект повернення та обмотування стеблової маси навколо маточин дискових вузлів [28].

Таблиця 2.2 – Кінематичні параметри дискових робочих органів та очисників рядка

Найменування кінематичного параметра	**Розрахунковий діапазон значень**	**Технологічний вплив на процес обробітку та розчищення смуги**
Кінематичний режим колтера, λc	0,95...1,02	Забезпечує чисте прорізання шару мульчі без згрібання решткiв [13, 21]
Кінематичний режим очисника, λrc	1,10...1,35	Створює відцентрове зусилля для відкидання стебел у міжряддя [28, 33]
Оптимальний кут атаки очисника, αa	12...18°	Визначає ширину зони повного розчищення поверхні смуги [10, 34]
Кутова швидкість очисника, ωrc	15...32 рад/с	Забезпечує динамічну компенсацію при зміні щільності агрофону [32, 34]

2.3. Силовий аналіз розпушувальної лапи-направлювача та визначення її загального тягового опору за різних швидкісних режимів

Під час виконання технологічного процесу смугового обробітку за технологією Strip-Till глибокорозпушувальна лапа-направлювач зазнає значних знакозмінних навантажень, зумовлених опором ґрунтового масиву на зсув, сколювання та прискорення деформованих мікрооб'ємів [13, 21]. Проектування комбінованих робочих органів вимагає точного визначення складових сил загального опору для обґрунтування міцнісних параметрів секції та вибору раціональної потужності енергетичного засобу [4]. Згідно з положеннями раціональної механіки суцільних середовищ, сумарне тягове зусилля складається зі статичної складової (деформація та подолання сил когезії) та динамічного складника, який залежить від квадрата швидкості руху агрегату [16, 27]. Аналітичне вираження для визначення загального тягового опору розпушувальної лапи-направлювача має такий вигляд:

$$R_{sh} = k_s \cdot b_l \cdot H_{sh} + \mu_s \cdot \rho \cdot b_l \cdot H_{sh} \cdot V_m^2 \quad (2.4)$$

де Rsh – загальний тяговий опір розпушувальної лапи-направлювача, кН; ks – коефіцієнт питомого статичного опору ґрунту деформації та різанню, кПа; bl – конструктивна ширина робочого долота лапи, м; Hsh – технологічна глибина ходу розпушувальної стійки, м; μs – безрозмірний динамічний коефіцієнт форми та шорсткості робочої поверхні лапи; ρ – щільність складення оброблюваного шару ґрунту, кг/м^3; Vm – поступальна швидкість руху ґрунтообробного агрегату, м/с.

Для дослідження просторового розподілу навантажень та визначення ліній дії результуючих зусиль розроблено розрахункову схему, яка враховує сили нормального тиску, тертя та реакції дна борознниПросторова декомпозиція векторів сил, що діють на робочі поверхні лапи-направлювача у поздовжньо-вертикальній площині, наведена на рисунку (Додаток).

Знання величини тягового опору Rsh дозволяє визначити вертикальну складову сили реакції ґнути, яка діє на робочий орган і прагне виглибити або додатково заглибити секцію культиватора [13]. Важливе значення для цього показника має геометричний кут нахилу леза долота. Розрахунок вертикальної складової сили опору здійснюється за залежністю:

$$R_z = R_{sh} \cdot \tan(\alpha_r + \varphi_f) \tag{2.5}$$

де Rz – вертикальна складова сили опору ґрунту, кН; αr – конструктивний кут різання (нахилу робочої грані долота до горизонталі), град; φf – кут зовнішнього тертя ґрунтового масиву об сталеву поверхню лапи, град.

Зміна поступальної швидкості руху призводить до перерозподілу часток енергії, що витрачається на крошіння. За результатами чисельного моделювання та силового аналізу при фіксованих параметрах геометрії лапи (bl = 0,04 м, Hsh = 0,25 м, ρ= 1350 кг/м^3) було встановлено динаміку зміни навантажень. Залежність складових сил опору та сумарної споживаної потужності від швидкісних режимів роботи наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Залежність складових сил опору та необхідної потужності від швидкісних режимів

Швидкість руху агрегату Vm, м/с (км/год)	**Статична складова опору, кН**	**Динамічна складова опору, кН**	**Загальний тяговий опір Rsh, кН**	**Споживана потужність на одну секцію, кВт**
1,67 (6,0)	1,40	0,11	1,51	2,52
2,22 (8,0)	1,40	0,20	1,60	3,55
2,78 (10,0)	1,40	0,31	1,71	4,75
3,33 (12,0)	1,40	0,44	1,84	6,13

Аналіз даних таблиці 2.3 показує, що при підвищенні швидкості від 6,0 до 12,0 км/год загальний тяговий опір Rsh зростає на 21,8% виключно через збільшення динамічного складника, тоді як необхідна енергоємність процесу (потужність) збільшується у 2,43 раза [4, 21]. Це підтверджує інженерну доцільність оптимізації кута різання αr та застосування звужених доліт із метою зменшення площі лобового перерізу стійки та мінімізації відкидання ґрунту за межі смуги обробітку при високих швидкостях [17, 19]. Комплексний силовий аналіз доводить, що для утримання енерговитрат у межах номінальних значень тракторів тягового класу 2,0–3,0, раціональним швидкісним діапазоном для модернізованого агрегату є Vm = 2,22...2,78 м/с (8,0...10,0 км/год) [1, 4].

2.4. Математичне моделювання процесу енергоємності смугового обробітку та параметричне обґрунтування пристроїв різнорівневої подачі туків

Енергетичний баланс функціонування комбінованого робочого органу для технології Strip-Till визначається сукупністю витрат потужності на механічне руйнування ґрунтового масиву та динамічне транспортування високодозових потоків гранульованих мінеральних добрив у вертикальному профілі смуги [4, 13]. Математичне моделювання цього процесу дозволяє встановити функціональні зв'язки між конструктивно-геометричними параметрами робочої

секції, швидкісними режимами руху й фізико-механічними властивостями середовища з метою мінімізації загальних питомих енерговитрат [4, 21]. Загальна питома енергоємність процесу комбінованого смугового обробітку ґрунту складається з механічної та пневмотранспортної компонент [6, 16]. Схема розподілу потужності та параметричні характеристики процесу пошарової подачі туків наведені на рисунку Б.4 (Додаток Б). Аналітична залежність для визначення питомої енергоємності процесу має такий вигляд:

$$e_{st} = \frac{R_{sh}}{B_{st} \cdot H_{sh}} + \frac{N_{pf}}{B_{st} \cdot H_{sh} \cdot V_m} \tag{2.6}$$

де est – питома енергоємність процесу комбінованого смугового обробітку ґрунту, Дж/м^3; Rsh – тяговий опір глибокорозпушувальної стійки секції, Н; Bst – конструктивна ширина обробленої смуги, м; Hsh – глибина технологічного ходу глибокорозпушувача, м; Npf – потужність, що витрачається на привод пневматичної системи дозування та транспортування туків до однієї секції, Вт; Vm – поступальна швидкість руху ґрунтообробного агрегату, м/с.

Параметричне обґрунтування пристроїв різнорівневого внесення добрив вимагає забезпечення стабільного швидкісного режиму руху гранул у тукопровідних магістралях для виключення пульсацій та забивання каналів висівного черевика глибокорозпушувача [6, 24]. Аеродинамічна швидкість транспортувального повітряного потоку повинна перевищувати критичну швидкість витання гранул добрив із урахуванням коефіцієнта запасу надійності [6, 26]. Розрахунок мінімально необхідної швидкості повітряного потоку у двоканальному тукопроводі здійснюється за формулою:

$$V_a = k_{sf} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot d_g \cdot (\rho_g - \rho_a)}{3 \cdot C_x \cdot \rho_a}} \tag{2.7}$$

де Va – мінімально необхідна швидкість повітряного потоку в тукопроводі комбінованої секції, м/с; ksf – коефіцієнт запасу для запобігання пульсаціям та забиванню каналів транспортування туків; g – прискорення вільного падіння, м/с^2; dg – середній еквівалентний діаметр гранул мінеральних добрив, м; ρg – дійсна щільність матеріалу гранул туків, кг/м^3; ρa – щільність транспортувального повітряного потоку, кг/м^3; Cx – коефіцієнт аеродинамічного опору гранул мінеральних добрив.

Оптимальні конструктивні та аеродинамічні параметри пристрою для різнорівневого внесення мінеральних добрив, отримані в результаті параметричного обґрунтування розробленої математичної моделі, зведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Конструктивно-технологічні та аеродинамічні параметри підживлювальної системи

Конструктивно-технологічні параметри підживлювальної системи	**Розрахункове значення параметра**	**Обґрунтування робочих діапазонів значень параметрів**
Робочий тиск повітря у нагнітальному колекторі, кПа	3,5...5,0	Забезпечення безперебійного транспортування високо–дозових потоків туків [6]
Швидкість повітряного потоку в тукопроводі, м/с	18...24	Перевищення критичної швидкості витання гранул для запобігання сегрегації [24]
Кут нахилу розподільного козирка черевика, град	35...45°	Забезпечення гравітаційного сповзання та чіткого поша–ро–вого розділення стрічок [6, 12]
Конструктивний діаметр тукопроводу секції, мм	32...40	Забезпечення пропускної здатності за максимальних норм внесення добрив [23]

Впровадження обґрунтованих геометричних та аеродинамічних параметрів двоканального висівного черевика дозволяє стабілізувати процес розподілу туків між технологічними горизонтами (0,10...0,12 м та 0,20...0,25 м) [6]. Це суттєво знижує енергоємність процесу пневматичного транспортування за рахунок виключення турбулентних завихрень у зоні поділу потоків та підвищує загальний

коефіцієнт корисної дії модернізованого ґрунтообробно-підживлювального агрегату [4, 12].

2.5. Розрахунок елементів конструкції комбінованого робочого органу (стійки, кріплень, паралелограмного механізму) на міцність та жорсткість

Надійна робота комбінованої секції в умовах знакозмінних динамічних навантажень та високого питомого опору ґрунту забезпечується раціональним вибором геометричних параметрів перерізів та матеріалів її тривальних елементів [19, 27]. Розрахунковими силовими факторами для оцінки міцності та жорсткості конструкції є максимальний тяговий опір глибокорозпушувальної лапи Rsh та вертикальна складова сили реакції ґрунту Rz, які були визначені під час силового аналізу [4, 13]. Найбільш навантаженими вузлами системи є вертикальна стійка паравекторного типу, елементи її кріплення (зрізний запобіжний болт) та повідці паралелограмного механізму копіювання рельєфу, які зазнають деформацій згину, зрізу та стиску-розтягу [17, 21]. Розрахункова схема розподілу еквівалентних напружень та деформацій у конструктивних елементах секції під дією зовнішніх сил наведена на рисунку (Додаток).

При аналізі міцності вертикальної стійки глибокорозпушувача її розглядають як консольну балку, що жорстко защемлена в кронштейні кріплення рами секції та навантажена на нижньому кінці зосередженою силою тягового опору Rsh [21]. Максимальне нормальне напруження згину σmax у небезпечному перерізі стійки виникає в точці її виходу з кріпильного кронштейна і визначається за залежністю:

$$\sigma_{max} = \frac{R_{sh} \cdot L_{sh}}{W_x} \leq [\sigma] \tag{2.8}$$

де σmax – максимальне нормальне напруження згину в стійці, Па; Rsh – максимальний тяговий опір розпушувальної лапи, Н; Lsh – відстань від носка

долота до критичного перерізу стійки (плече прикладання сили), м; Wx – момент опору поперечного перерізу стійки відносно головної осі згину, м^3; [σ] – допустиме напруження на згин для матеріалу конструкції з урахуванням коефіцієнта динамічності, Па.

Критерієм жорсткості стійки є її максимальне пружне відхилення (прогин) fmax у горизонтальній площині під дією експлуатаційних навантажень, що впливає на стабільність утримання заданої глибини обробітку смуги та рівномірність подачі добрив [4, 18]. Величина цього відхилення аналітично описується рівнянням:

$$f_{max} = \frac{R_{sh} \cdot L_{sh}^3}{3 \cdot E \cdot I_x} \leq [f] \tag{2.9}$$

де fmax – максимальний пружний прогин стійки робочого органу, м; Е – модуль поздовжньої пружності матеріалу стійки, Па; Ix – осьовий момент інерції поперечного перерізу стійки, м^4; [f] – допустимий агротехнічний прогин за умов збереження стабільності глибини ходу, м.

Розрахунок кріплень включає визначення діаметра запобіжного зрізного болта, який захищає секцію від руйнування при наїзді на приховані перешкоди [6, 17]. Повідці паралелограмного механізму розраховують на стійкість та міцність при сумісній дії поздовжніх сил та згинальних моментів, що виникають внаслідок бокових навантажень [4, 27]. Порівняльні результати розрахунків міцності, жорсткості та запасів міцності елементів конструкції за умови використання легованої сталі марки 45Х наведено в таблиці 2.5.

Отримані дані таблиці 2.5 підтверджують, що вибрані геометричні розміри поперечного перерізу стійки (30х80 мм) та повідців паралелограма забезпечують необхідну міцнісну надійність конструкції комбінованого робочого органу при максимальних експлуатаційних швидкостях обробітку [4]. Коефіцієнт запасу міцності зрізного болта (1,13) гарантує його чітке спрацьовування та руйнування при перевищенні номінального тягового опору на 15...20%, що виключає

виникнення пластичних деформацій тривального кронштейна секції культиватора [17]. Паралелограмний механізм копіювання має високу жорсткість у поперечній площині, що мінімізує кутові коливання секції та гарантує точність смугової локалізації тукових депо відносно центральної осі рядка [7, 18].

Таблиця 2.5 – Розрахункові показники міцності та жорсткості конструктивних елементів секції

Елемент конструкції комбінованого органу	**Тип деформації та розрахунковий фактор**	**Розрахункове напруження (прогин)**	**Допустиме значення матеріалу**	**Коефіцієнт запасу міцності**
Стійка глибокорозпушувача	Згин у поздовжній площині, σmax[21]	245 МПа	380 МПа	1,55
Стійка глибокорозпушувача	Пружне відхилення (жорсткість), fmax [4]	8,4 мм	15,0 мм	–
Зрізний запобіжний болт кріплення	Зріз при перевантаженні, τsh [17]	185 МПа	210 МПа	1,13
Верхній повідець паралелограма	Стиск зі згином (поздовжній згин), σc[27]	115 МПа	220 МПа	1,91
Нижній повідець паралелограма	Розтяг под навантаженням, σt[6]	95 МПа	220 МПа	2,31

Висновки до розділу

Обґрунтовано геометричне компонування елементів комбінованої секції з поздовжнім зсувом Loff, що в поєднанні з коефіцієнтами кінематичного режиму прорізного колтера λc = 0,95...1,02) та очисника рядка λrc} = 1,10...1,35) забезпечує повне перерізання та відведення пожнивних решток за межі смуги по траєкторії подовженої циклоїди без винесення нижніх вологих шарів ґрунту на поверхню поля [4, 28, 33].

Силовим аналізом встановлено, що підвищення поступальної швидкості руху з 6,0 до 12,0 км/год спричиняє лінійне зростання тягового опору лапи-направлювача Rsh на 21,8% (до 1,84 кН) за рахунок динамічного складника механічного опору ґрунту, при цьому необхідна потужність на привод однієї секції збільшується у 2,43 раза (до 6,13 кВт), що обґрунтовує раціональний за енерговитратами швидкісний режим в діапазоні 8,0...10,0 км/год [4, 21].

Математичним моделюванням процесу енергоємності доведено, що стабільний дворанговий розподіл тукових стрічок на технологічні горизонти 0,10...0,12м та 0,20...0,25м без утворення пульсацій і забивання пневмомагістралей досягається при швидкості повітряного потоку 18...24 м/с, робочому тиску повітря у колекторі 3,5...5,0 кПа та куті нахилу розподільного козирка черевика 35...45°[6, 24].

Розрахунками елементів конструкції з легованої сталі марки 45Х на міцність та жорсткість підтверджено конструктивну надійність стійки перерізом 30х80 мм, де максимальні напруження згину стануть σmax= 245 МПа при допустимих 380 МПа (коефіцієнт запасу міцності 1,55), а пружний прогин становить fmax = 8,4 мм. Встановлено, що параметри кріплення із запасом міцності зрізного болта 1,13 забезпечують його руйнування при перевищенні номінального навантаження на 15...20%, гарантуючи захист тривальних елементів секції від пластичних деформацій [17, 21].

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СМУГОВИХ ҐРУНТООБРОБНИХ АГРЕГАТІВ

Управління безпекою праці при експлуатації модернізованих смугових машин базується на принципах превентивного контролю виробничих ризиків та регламентується чинними нормативно-правовими актами з охорони праці в агропромисловому комплексі [15]. Специфіка роботи комбінованого агрегату поєднує в собі небезпеки, характерні як для важких глибокорозпушувальних машин, так і для систем пневматичного транспортування та внесення хімічно активних концентрованих речовин [6, 19].

3.1. Комплексний аналіз умов праці та потенційних небезпечних виробничих факторів під час обслуговування комбінованих Strip-Till машин

Технологічний процес смугового обробітку супроводжується значними динамічними навантаженнями, високою швидкістю руху та пилоутворенням. Для системної оцінки виробничого середовища проведено ідентифікацію небезпек, результати якої наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Класифікація потенційних небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Група факторів	Конкретний прояв при експлуатації Strip-Till	Джерело виникнення ризику
Механічні	Травмування рухомими елементами, защемлення пальцями паралелограма, удари при заміні зрізних болтів	Важкі підпружинені робочі секції, дискові колтери, заглиблені стійки [19]
Хімічні	Органічні отруєння, інгаляційне ураження дихальних шляхів пилом мінеральних добрив, хімічні burns шкіри	Концентровані аеродисперсні потоки тукових систем при завантаженні та висіві [14, 15]
Фізичні	Підвищений рівень шуму та вібрації, значне фізичне перевантаження при ручному регулюванні вузлів	Робота приводного вентилятора пневмосистеми, високий питомий опір ґрунту [4, 15]

Аналіз даних таблиці 3.1 показує, що обслуговування комбінованих модулів вимагає жорсткого дотримання регламентів безпеки, особливо під час проведення польових регулювань кутів атаки дисків-очисників та заміни спрацьованих елементів кріплення глибокорозпушувача [15, 19].

3.2. Інженерно-технічні заходи щодо забезпечення безпеки експлуатації туковисівних систем та пневмо-транспортних магістралей добрив

Безпека функціонування високодозових пневматичних систем підживлення лімітується герметичністю з'єднань та міцністю полімерних магістралей під дією надлишкового тиску аеросуміші [6]. Максимальне нормальне напруження у стінці гнучкого тукопроводу під дією внутрішнього повітряного тиску вентилятора визначається за рівнянням Лапласа:

$$\sigma_w = \frac{P_{in} \cdot d_{tp}}{2 \cdot \delta_w} \leq [\sigma_p] \tag{3.1}$$

де σw – розрахункове нормальне напруження в стінці тукопроводу, Па; Pin – максимальний надлишковий тиск повітря в магістралі, Па; dtp – внутрішній діаметр тукопроводу секції, м; δw – товщина стінки трубопроводу, м; [σp] – допустиме напруження на розрив для полімерного матеріалу магістралі, Па.

Для унеможливлення руйнування магістралей за формулою (3.1) та запобігання хімічному ураженню оператора пилом туків, інженерно-технічний комплекс модернізації передбачає встановлення запобіжного розвантажувального клапана на головному нагнітальному колекторі вентилятора, який обмежує тиск на рівні понад 5,0 кПа [6, 24]. Додатково впроваджується обов'язкове заземлення металевого каркаса тукового бункера за допомогою електропровідного ланцюга для зняття електростатичного заряду, що генерується при терті гранул об стінки розподільника [19].

3.3. Моделювання сценаріїв небезпечних ситуацій під час роботи комбінованих робочих органів та систем підживлення під час забивання чи наїзду на перешкоди

Ефективне управління безпекою праці вимагає не лише реагування на вже існуючі проблеми, а й системного прогнозування можливих небезпечних подій за допомогою моделювання ланцюжків ризиків [15, 19]. Логічна схема розвитку аварійних ситуацій під час експлуатації модернізованого агрегату наведена на рисунку (Додаток). Моделювання базується на послідовному переході від початкових умов через небезпечні чинники до небезпечних ситуацій, результатом яких є небажані наслідки: аварії, травми, отруєння або загальні збитки.

Сценарій 1 (Наїзд на приховану перешкоду): Початкова умова (НУ) характеризується високою швидкістю руху агрегату, де поступальна швидкість становить Vm = 2,78 м/с, на полі з наявністю заглиблених каменів або залишків пнів. Небезпечний чинник (НД) полягає в миттєвому зростанні тягового опору лапи понад критичну межу, коли опір стійки становить Rsh > 1,84 кН. Небезпечна ситуація (НС) виникає в момент руйнування зрізного болта та різкого відкидання стійки назад-вгору пружинним демпфером. Кінцевим наслідком є виникнення загальних збитків (З) через простій техніки або отримання механічних травм (Т) оператором при спробі заміни болта на похилій поверхні поля без попередньої фіксації секції стопорами [17, 21].

Сценарій 2 (Забивання міждискового простору): Початкова умова (НУ) характеризується підвищеною вологістю верхнього шару ґрунту та високим фоном стебел кукурудзи. Небезпечний чинник (НД) полягає в повній зупинці обертання очисних дисків, коли їх кутова швидкість становить ωrc} = 0 рад/с, та утворенні суцільного ґрунтового моноліту попереду секції. Небезпечна ситуація (НС) реалізується при спробі оператора очистити міждисковий простір вручну без вимкнення вала відбору потужності трактора та без фіксації ручного гальма.

Кінцевим небажаним наслідком є отримання важких механічних травм (Т) кінцівок рухомими елементами суміжних секцій сівалки чи культиватора [15, 28].

Висновки до розділу

Ідентифіковано ключові шкідливі виробничі фактори (механічні, хімічні, фізичні) під час обслуговування Strip-Till машин та встановлено, що найбільші ризики травмування виникають при регулюванні важких паралелограмних підвісок та заміні запобіжних елементів глибокорозпушувачів [15, 19].

Обґрунтовано комплекс інженерно-технічних заходів безпеки для пневмотранспортних систем, який включає обмеження нормального напруження стінок тукопроводів σw шляхом встановлення скидних клапанів на тиск до 5,0 кПа та обов'язкове заземлення бункера для нейтралізації статичної електрики [6, 19].

Застосовано проактивний метод моделювання аварійних сценаріїв за структурою «НУ →НД →НС →Наслідки», що дозволило деталізувати фізику розвитку небезпек при наїзді на приховані перешкоди та забиванні робочих органів вологою масою, визначивши точки ефективного превентивного втручання [15, 19].

РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

Економічне обґрунтування інженерних рішень щодо модернізації серійних культиваторів під технологію Strip-Till базується на порівнянні капітальних вкладів із фінансовим ефектом від скорочення кількості проходів техніки, зниження витрат палива та оптимізації доз мінерального живлення [1, 4]. Пряма інтеграція комбінованих модулів на наявні жорсткі рами дозволяє сільськогосподарським підприємствам уникнути значних витрат на купівлю спеціалізованих імпортних агрегатів смугового обробітку [6].

4.1. Розрахунок капітальних витрат на виготовлення, модернізацію та інтеграцію комбінованих робочих органів на раму серійного культиватора

Сума капітальних інвестицій на реалізацію запропонованого технічного рішення охоплює витрати на матеріали, механічну обробку елементів комбінованих секцій, придбання пневматичної системи дозування та складальні роботи. Загальні капітальні витрати на модернізацію агрегату визначаються за залежністю:

$$K_m = n \cdot (C_{mod} + C_{inst}) + C_{sys} \quad (4.1)$$

де Km – загальні капітальні витрати на модернізацію ґрунтообробно-підживлювального агрегату, грн; n – кількість встановлених комбінованих Strip-Till модулів, шт; Cmod – собівартість матеріалів та виготовлення одного комбінованого модуля, грн; Cinst – вартість монтажних робіт з інтеграції однієї секції на раму, грн; Csys – вартість централізованої пневмотранспортної туковисівної системи в комплекті з вентилятором, грн.

Вартість матеріальних ресурсів та комплектувальних вузлів для 8-рядного агрегату на базі рами культиватора КРН-5,6 зведені в єдину структуру капітальних вкладень, яку наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Структура капітальних витрат на модернізацію культиватора КРН-5,6

Найменування статті капітальних витрат	**Розрахунок на одиницю (компонент), грн**	**Загальна вартість для агрегату (n=8), грн**
Конструкційні матеріали (сталь 45Х, листовий прокат)	12500	100000
Механічна та термічна обробка (точіння, фрезерування, гартування)	8000	64000
Комплектуючі вузли (диски-колтери, підшипникові вузли, котки)	9500	76000
Пневмотранспортна розподільна система добрив з бункером (Csys)	–	135000
Складально-монтажні та пуско–налагоджувальні роботи (C_inst)	3000	24000
Разом капітальних вкладень (Km)	–	**399000**

Економічні показники таблиці 4.1 доводять, що сумарні витрати на повне переобладнання рами становлять 399000 грн, що в 4...5 разів менше за ринкову вартість нових заводських машин аналогічної захватної спроможності [1].

4.2. Визначення операційних та експлуатаційних витрат при виконанні технологічного процесу смугового обробітку з одночасним підживленням

Прямі операційні витрати на виконання комбінованої технологічної операції розраховують на один гектар обробленої площі. Вони включають оплату праці механізатора, амортизацію модернізованих елементів та витрати на дизельне паливо [4]. Розрахунок питомих операційних витрат здійснюється за формулою:

$$C_{op} = C_{fuel} + C_{lab} + C_{maint} + C_{amort} \quad (4.2)$$

де Cop – прямі операційні витрати на виконання процесу, грн/га; Cfuel – витрати на дизельне паливо, грн/га; Clab – витрати на оплату праці обслуговчого персоналу з нарахуваннями, грн/га; Cmaint – витрати на поточний технічний сервіс та заміну швидкозношуваних деталей, грн/га; Camort – амортизаційні відрахування на відновлення технічних засобів, грн/га.

Завдяки суміщенню розпушування, розчищення смуг та пневматичного закладання туків за один прохід замість традиційних декількох операцій, питома витрата палива знижується з 28,5 л/га до 14,2 л/га [4, 6]. Порівняльний аналіз структури експлуатаційних витрат для розробленого агрегату та базового комплексу машин наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Експлуатаційні та операційні витрати на обробіток 1 га площі

Стаття операційних витрат	**Базова технологія (оранка + внесення туків), грн/га**	**Запропонована технологія (модернізований Strip-Till), грн/га**
Витрати на дизельне паливо (Cfuel)	1560	780
Оплата праці з нарахуваннями (Clab)	240	110
Амортизаційні відрахування (Camort)	185	130
Технічне обслуговування та ремонт (Cmaint)	145	115
Сумарні питомі витрати (Cop)	**2130**	**1135**

Дані таблиці 4.2 вказують на пряме зниження експлуатаційних витрат на кожному гектарі обробітку на 995 грн, що досягається за рахунок високої паливної ефективності та зменшення трудомісткості процесу [13].

4.3. Оцінка економічного ефекту від зниження енерговитрат, підвищення врожайності та розрахунок терміну окупності модернізованого агрегату

Загальний річний економічний ефект формується як за рахунок прямого заощадження експлуатаційних ресурсів, так і внаслідок підвищення врожайності просапних культур через пошарове стрічкове депонування добрив у зону активного росту кореневої системи [7, 24]. Розрахунок річного економічного ефекту виконується за залежністю:

$$E_a = (C_{op1} - C_{op2}) \cdot W_a + \Delta Y \cdot P_{cr} \cdot W_a \quad (4.3)$$

де Ea – річний економічний ефект від експлуатації модернізованої машини, грн/рік; Cop1 – операційні витрати за базовою технологією обробітку, грн/га; Cop2 – операційні витрати за запропонованою технологією Strip-Till, грн/га; Wa – річний обсяг використання розробленого агрегату, га/рік; ΔY – середній приріст урожайності кукурудзи, т/га; Pcr – ринкова ціна реалізації вирощеної продукції, грн/т.

Прийнявши річне навантаження на рівні Wa = 400 га/рік, мінімальний приріст урожайності кукурудзи ΔY = 0,45 т/га [7] та ціну реалізації зерна Pcr = 6200 грн/т, за формулою (4.3) отримано значення річного економічного ефекту Ea = 1514000 грн/рік.

Термін окупності капітальних інвестицій на переобладнання культиватора визначається за залежністю:

$$T_{pb} = \frac{K_m}{E_a} \quad (4.4)$$

де Tpb – термін окупності капітальних витрат, років; Km – сумарні капітальні вкладення на модернізацію, грн.

На основі розрахунку за формулою (4.4) встановлено конкретний термін окупності капітальних вкладень, який становить Tpb = 0,26 року. Отримане значення свідчить, що витрачені кошти на виготовлення та інтеграцію комбінованих секцій повністю повертаються підприємству менш ніж за один весняний сезон експлуатації машини.

Висновки до розділу

Розрахунком капітальних вкладень встановлено, що повна вартість модернізації та побудови 8-рядної комбінованої системи Strip-Till на базі серійної рами культиватора КРН-5,6 становить 399000 грн, що мінімізує початкові інвестиції порівняно з купівлею фабричних імпортних аналогів у 4...5 разів [1, 6].

Визначено, що впровадження розробленого агрегату забезпечує зменшення питомих експлуатаційних витрат на 46,7% (на 995 грн/га) внаслідок дворазового зниження витрати дизельного палива (до 14,2 л/га) та скорочення витрат на оплату праці механізаторів через суміщення технологічних операцій [4, 13].

Доведено високу техніко-економічну ефективність запропонованого конструктивного рішення: при річному напрацюванні 400 га загальний економічний ефект становить 1514000 грн/рік за рахунок ресурсозбереження та стабільного підвищення врожайності кукурудзи на 0,45 т/га, що забезпечує окупність інвестицій за 0,26 року експлуатації [7, 24].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення та нове вирішення актуальної науково-практичної задачі щодо підвищення ефективності процесу смугового обробітку ґрунту та локального підживлення шляхом розробки комбінованої секції Strip-Till та обґрунтування її конструктивно-технологічних, кінематичних, аеродинамічних і силовими параметрів.

На основі аналізу систем землеробства доведено агротехнічну доцільність переходу на просторово-диференційований обробіток, який стабілізує щільність складення орного шару в межах 1,15...1,22г/см^3, забезпечує збереження до 75...80% продуктивної вологи та підвищує температуру насіннєвого ложа навесні на 3...5 °С порівняно з технологіями No-Till [4, 8, 20].

Кінематичним аналізом обґрунтовано параметри пасивних дискових робочих органів комбінованого модуля, де узгодження безрозмірних коефіцієнтів швидкості колтера (λc = 0,95...1,02) та очисника рядка (λrc = 1,10...1,35) із величиною поздовжнього зсуву робочих органів Loff гарантує безперервне очищення берми по траєкторії подовженої циклоїди без ризику забивання суміжних зон рослинними рештками [4, 28, 33].

На основі математичного моделювання енергетичного балансу та силового аналізу встановлено раціональний швидкісний діапазон руху агрегату в межах Vm = 2,22...2,78м/с (8,0...10,0 км/год). Перевищення цієї межі призводить до нелінійного зростання динамічного опору глибокорозпушувача Rsh та збільшення необхідної енергоємності процесу на одну секцію у 2,43 раза (до 6,13 кВт) [4, 21].

Параметричним обґрунтуванням пневмотранспортної підживлювальної системи визначено, що для стабільного дворангового закладання добрив на горизонти 10...12 см та 20...25 см без утворення пульсацій потоку необхідно забезпечити швидкість повітря у тукопроводах на рівні 18...24 м/с при робочому тиску в колекторі 3,5...5,0 кПа та куті нахилу розподільного козирка спліт-черевика 35...45° [6, 23, 24].

Розрахунками на міцність та жорсткість підтверджено конструктивну надійність тривальних елементів секції із легованої сталі марки 45Х (переріз стійки 30х80 мм, σmax = 245 МПа, пружний прогин fmax = 8,4мм). Застосування запобіжного кріплення із коефіцієнтом запасу міцності зрізного болта 1,13 забезпечує його руйнування при перевантаженні на 15...20%, захищаючи конструкцію від пластичних деформацій при наїзді на приховані перешкоди [4, 17, 21].

Комплексним аналізом умов праці та моделюванням аварійних сценаріїв за структурою «НУ → НД →НС → Наслідки» обґрунтовано превентивні інженерні заходи безпеки, що включають обмеження напруження стінок тукопроводів σw шляхом встановлення розвантажувальних клапанів та обов'язкове заземлення металевого бункера для нейтралізації статичної електрики [6, 15, 19].

Розрахунок техніко-економічної ефективності підтвердив інженерну доцільність інтеграції розроблених модулів на раму серійного культиватора КРН-5,6, що знижує капітальні інвестиції (Km = 399000 грн) у 4...5 разів порівняно з купівлею імпортних аналогів. За рахунок зменшення операційних витрат на 46,7% та підвищення врожайності кукурудзи на 0,45 т/га річний економічний ефект становить Ea = 1514000грн/рік, забезпечуючи термін окупності капітальних вкладень Tpb = 0,26 року [1, 4, 7, 13].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Войновський В. Культиватори-підживлювачі. Огляд ринку. *Техніка і технології АПК*. 2021. № 1 (118). URL: https://www.ndipvt.com.ua/TiTAPK/2021/TTAPK20_01_tapk_2021_01.pdf (дата звернення: 17.05.2026).
2. Офіційний відеоканал ТОВ «ВЕЛЕС-АГРО ЛТД.». Робота агрегату полосового обробітку ґрунту Strip-Till з функцією внесення сухих мінеральних добрив. *YouTube*. 2017. URL: https://www.youtube.com/watch?v=76kpAnPaRno (дата звернення: 17.05.2026).
3. Романчук П. Відгук фермера про перший в Україні strip-till агрегат Schlagel Rapid-Till. *YouTube*. 2025. URL: https://www.youtube.com/watch?v=Gt6zrKq_vow (дата звернення: 17.05.2026).
4. Середа Л. П., Ковальчук Д. А. Математичне моделювання ґрунтообробного агрегату в системі «Ґрунт-агрегат-енергетичний засіб» для Strip-till технології обробітку ґрунту. *Техніка та енергетика*. 2021. № 12 (4). С. 103–108. URL: http://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/30607.pdf (дата звернення: 17.05.2026).
5. Томчук В. В. Тенденції підживлення рослин за нових виробничих умов. *Slovak international scientific journal*. 2020. Vol. 1, № 41. С. 7–17. URL: https://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/25106.pdf (дата звернення: 17.05.2026).
6. Шаргородський С. А., Галанський В. В. Основні装конструкції секцій для внесення добрив у розрізі технології Strip-Till. *Техніка, енергетика, транспорт в АПК*. 2022. № 4 (119). С. 61–67. DOI: https://doi.org/10.37128/2520-6168-2022-4-8. URL: https://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/32608.pdf (дата звернення: 17.05.2026).
7. Adee E., Hansel F. D., Ruiz Diaz D. A., Janssen K. Corn Response as Affected by Planting Distance from the Center of Strip-Till Fertilized Rows. *Frontiers in Plant Science*. 2016. Vol. 7. Art. 1232. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01232.

8. Ahmet Celik, Sefa Altikat, Thomas R. Way. Strip tillage width effects on sunflower seed emergence and yield. *Soil and Tillage Research*. 2013. Vol. 131. P. 20–27. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2013.03.004.
9. Binfield Agro. Технологія стріп-тіл (strip till): обробка грунту, добрива та співпраця з AgriLab. *YouTube*. 2020. URL: https://www.youtube.com/watch?v=sClv-fYGuGs (дата звернення: 17.05.2026).
10. Chen H., Hou L., Hou S., Li Y., Min S., Cai Y. Design and Optimization Experiment of Anti-blocking Mechanism of No-tillage Planter for Grand Ridge with Raw Corn Stubble. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2018. Vol. 49. P. 59–67. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.007.
11. Fang H., Niu M., Zhu Z., Zhang Q. Experimental and Numerical Investigations of the Impacts of Separating Board and Anti-Blocking Mechanism on Maize Seeding. *Journal of Agricultural Engineering*. 2022. Vol. 53. URL: https://www.agroengineering.org/jae/article/view/1273/939 (дата звернення: 17.05.2026).
12. Foxhoven S. W. New innovations for the 4R's of nutrient stewardship to improve corn productivity : Doctoral dissertation. Urbana-Champaign : University of Illinois, 2022. URL: https://hdl.handle.net/2142/116146 (дата звернення: 17.05.2026).
13. Gill W. R., Vanden Berg G. E. Soil dynamics in tillage and traction. Washington : Agricultural Research Service, U.S. Dept. of Agriculture, 1967. 511 p. URL: https://books.google.com.ua/books?id=ynowAAAAYAAJ (дата звернення: 17.05.2026).
14. Halsall M. Your fall fertility primer. *Grainews*. 2021. URL: https://www.grainews.ca/features/your-fall-fertility-primer/ (дата звернення: 17.05.2026).
15. Jakob M. C., Santa D., Holte K. A., Sikkeland I. J., Hilt B., Lundqvist P. Occupational Health and Safety in Agriculture – a brief report on organization, legislation and support in selected European countries. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*. 2021. Vol. 28 (4). P. 452–457. DOI: 10.26444/aaem/140197.

16. Karmakar S., Kushwaha R. L. Dynamic modeling of soil–tool interaction: An overview from a fluid flow perspective. *Journal of Terramechanics*. 2006. Vol. 43, Issue 4. P. 411–425. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jterra.2005.05.001.
17. Knobloch D., Johnson D. T. Strip-till primary tillage system : Pat. 6871709 B2 US. No. 10/353493 ; appl. 29.01.2003 ; publ. 29.03.2005. URL: https://patents.google.com/patent/US6871709B2/en (дата звернення: 17.05.2026).
18. Kozachenko O. V., Syedykh K. V., Shkrehal O. M. Mathematical modeling of stability of mechanical system of discator. *Machinery and Energetics*. 2021. Vol. 12 (4). P. 61–66. DOI: 10.31548/machenergy2021.04.061.
19. Kutz M. (Ed.). Handbook of farm, dairy and food machinery engineering. Academic Press, 2019. URL: https://books.google.com.ua/books?id=ZZadDwAAQBAJ (дата звернення: 17.05.2026).
20. Licht M. A., Al-Kaisi M. Strip-tillage effect on seedbed soil temperature and other soil physical properties. *Soil and Tillage Research*. 2005. Vol. 80, Issues 1–2. P. 233–249. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.017.
21. McKyes E. Soil Cutting and Tillage. Amsterdam : Elsevier, 1985. 217 p. URL: https://books.google.com.ua/books?id=Ho1SW55M13cC (дата звернення: 17.05.2026).
22. Moore E. Is Zone Placement Better Than Banding Fertilizer? *Strip-Till Farmer*. 2018. URL: https://www.striptillfarmer.com/articles/2692-is-zone-placement-better-than-banding-fertilizer (дата звернення: 17.05.2026).
23. New fertilizer application unit. *FarmProgress*. 2016. URL: https://www.farmprogress.com/farming-equipment/new-fertilizer-application-unit (дата звернення: 17.05.2026).
24. Nkebiwe P. M., Weinmann M., Bar-Tal A., Müller T. Fertilizer placement to improve crop nutrient acquisition and yield: A review and meta-analysis. *Field Crops Research*. 2016. Vol. 196. P. 389–401. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.018.
25. Rádics J. P. D. Development of modular-built strip-tillage implement for minimum tillage experiments in Hungary. 2011. URL:

https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/104011438/sa2011_p0540-libre.pdf (дата звернення: 17.05.2026).

26. Randall G. W., Hoeft R. G. Placement methods for improved efficiency of P and K fertilizers: a review. *Journal of Production Agriculture*. 1988. Vol. 1, No. 1. P. 70–79. DOI: 0890-8524.
27. Rogovskii I. L., Titova L. L., Trokhaniak V. I., Haponenko O. I., Ohiienko M. M., Kulik V. P. Engineering management of tillage equipment with concave disk spring shanks. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 60, No. 1. P. 45−52. DOI: https://doi.org/10.35633/INMATEH-60-05.
28. Shi N., Chen H., Wang X., Chai Y., Wang H., Hou S. Design and experiment optimization of prevent bring back stubble mechanism of spring-tooth type cleaning device. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2019. Vol. 50. P. 84–91. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.010.
29. Steinlage D. L., Mariman N. A. Split rolling basket for strip tillage implement : Pat. 7806197 B2 US. No. 11/854247 ; appl. 12.09.2007 ; publ. 05.10.2010. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/fc/c8/50/8e96a12449b8d0/US8006775.pdf (дата звернення: 17.05.2026).
30. Tang Z., Zeng Z., Wu S., Fu D., Cai Y., Zhang Y., Cai Z., Jiang Y., Chen Y., Gong H., Qi L. Side-deep banding liquid fertilizer during transplanting for indica rice crops promoted root system development to enhance grain yield and improve nitrogen use efficiency. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2025. Vol. 22. Art. 102042. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102042.
31. Wu P., Liu F., Li H., Cai T., Zhang P., Jia Z. Suitable fertilizer application depth can increase nitrogen use efficiency and maize yield by reducing gaseous nitrogen losses. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 781. Art. 146787. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146787.
32. Yao W., Zhao D., Miao H., Cui P., Wei M., Diao P. Design and Experiment of Oblique Anti-blocking Device for No-tillage Planter with Shallow Plowing Stubble Clearing. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2022. Vol. 53. P. 42–52. URL:

https://www.nyjxxb.net/index.php/journal/article/view/1409/1403 (дата звернення: 17.05.2026).

33. Yao W., Zhao D., Xu G., Chen M., Miao H., Diao P. Design and Experiment of Anti-blocking Device for Strip to Row Active Corn No-tillage Seeding. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2020. Vol. 51. P. 55–62, 71. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.007.
34. Zhang Y., Hao Z., Xu T., Diao P., Zhou H., Mei W. Design and Experiment of Dynamic Compensation Adaptive Straw Removal Device for Corn No-till Planter. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2025. Vol. 56. P. 174–185. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2025.01.018.

ДОДАТКИ