

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 першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
на тему:**

«Механізація вирощування пшениці озимої з модернізацією
грунтообробного агрегату»

Виконав здобувач вищої освіти IV курсу,
групи АІ-22-1

ОПП «Агроінженерія»

спеціальності 208 «Агроінженерія»

_____ Москаленко Єгор Володимирович

« ____ » _____ 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

_____ Дмитро ПЕТРЕНКО

« ____ » _____ 2026 р.

Рецензент

професор, д-р техн. наук

_____ Юрій КУЛЄШКОВ

« ____ » _____ 2026 р.

Анотація

Тема: «Механізація вирощування пшениці озимої з модернізацією грунтообробного агрегату»

У роботі розроблено комплексну механізацію технологічних процесів вирощування пшениці озимої з акцентом на передпосівний обробіток ґрунту. Обґрунтовано перехід до енергоощадних операцій шляхом модернізації агрегату КГА-4. Запропоновано заміну жорстких стійок культиватора на пружні S-подібні елементи зі сталі 65Г, що знизило динамічні навантаження на раму на 25...35%. Розраховано експлуатаційні показники агрегату з трактором Т-150К. Доведено, що оновлена конструкція забезпечує створення насінневого ложа щільністю 1,0...1,2 г/см³, підвищуючи загальну енергоефективність вирощування культури.

Ключові слова: механізація, пшениця озима, модернізація, S-подібна стійка, технологічний процес, енергоефективність

Abstract

Topic: «Mechanization of winter wheat cultivation with modernization of the tillage unit»

The study develops the complex mechanization of technological processes for winter wheat cultivation with an emphasis on pre-sowing soil tillage. The transition to energy-saving operations is substantiated by modernizing the KGA-4 unit. It is proposed to replace rigid cultivator tines with S-shaped spring elements made of 65G steel, which reduced dynamic loads on the frame by 25...35%. The operational performance of the unit with the T-150K tractor was calculated. It is proved that the updated design ensures the creation of a seedbed with a density of 1.0...1.2 g/cm³, increasing the overall energy efficiency of crop cultivation.

Keywords: mechanization, winter wheat, modernization, S-shaped tine, technological process, energy efficiency

ЗМІСТ

Номер розділу	Структурна одиниця і розділ	Сторінка
1	Вступ	
2	Аналіз технології вирощування пшениці озимої	
3	Операційна технологія обробітку ґрунту	
4	Інженерна частина	
5	Охорона праці	
6	Загальні висновки	
-	Список використаної літератури	
-	Додатки	

1. ВСТУП

Пшениця озима традиційно залишається стратегічним фундаментом продовольчої безпеки та головною експортною культурою агропромислового комплексу. Проте в умовах сучасної глобальної нестабільності та зростання цін на ресурси, її рентабельність безпосередньо залежить від здатності господарства оптимізувати кожну технологічну операцію. Найбільш критичним та енергоємним етапом у циклі вирощування є підготовка ґрунту. Статистичні дані свідчать, що на частку ґрунтообробних операцій припадає до 40% загальних витрат пального та майже 30% прямих трудовитрат [3, 4, 8]. Використання морально застарілих або неадаптованих технічних засобів призводить не лише до економічних втрат, а й до деградації структури поля.

У цьому контексті механізація вирощування пшениці виходить на новий рівень, де ключову роль відіграє модернізація агрегатів для суцільного обробітку. Класичні конструкції часто не забезпечують необхідної якості подрібнення рослинних решток та вирівнювання поверхні за один прохід, що змушує аграріїв проводити повторні операції, збільшуючи собівартість продукції. Саме тому вдосконалення існуючого парку техніки постає як безальтернативний шлях адаптації до вимог точного землеробства. Модернізація робочих органів агрегату дозволяє досягти синергетичного ефекту: з одного боку, ми отримуємо ідеальне насіннєве ложе для рівномірних сходів озимини, а з іншого – суттєво знижуємо тяговий опір машини.

Таким чином, перехід від традиційних схем механізації до модернізованих комбінованих рішень є не просто технічним оновленням, а стратегічним кроком до підвищення конкурентоспроможності агропідприємства.

					МВП 00.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата				
Розроб.	Москаленко				Пояснювальна записка		Літ.	Аркуш
Перев.	Петренко							Аркушів
Н.контр.	Артеменко						ЦНТУ, гр. АІ-22-1	
Затв.	Васильковський							

2. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ

2.1. Господарське значення та біологічні особливості пшениці озимої

Пшениця озима є однією з найважливіших зернових культур світу та провідною культурою зернового господарства України. Частка її у структурі посівних площ зернових культур стабільно перевищує 40...45%, що зумовлено поєднанням високої продуктивності, широкої екологічної пластичності та багатофункціональності зерна – від харчового і кормового використання до переробної промисловості [1-3, 6, 7].

Біологічні особливості культури визначають специфіку агротехнічних вимог і, відповідно, склад машинно-тракторних агрегатів для кожного технологічного процесу. Пшениця озима належить до рослин тривалого дня, потребує яровизації – впливу низьких температур протягом 35...60 днів, що забезпечується при осінньому посіві [1-3]. Оптимальна температура проростання насіння становить +12...15°C, а критична температура вимерзання при відсутності снігового покриву – мінус 16...18°C у вузлі кущення [2-4]. Ці чинники зумовлюють жорсткі вимоги до строків сівби і глибини загортання насіння, контроль яких у сучасному виробництві здійснюється переважно засобами точного землеробства.

Тривалість вегетаційного періоду культури становить 270...330 днів і охоплює два принципово різні етапи: осінню вегетацію (45...65 днів) та весняно-літню (165...210 днів) [2-4, 7]. Осінній період включає фази сходів, кущення і початок формування вторинної кореневої системи, що закладає підґрунтя зимостійкості й продуктивності посіву. Весняно-літня вегетація охоплює відновлення вегетації, вихід у трубку, колосіння, цвітіння, наливання і дозрівання зерна. Кожна із цих фаз потребує специфічного машинно-технологічного супроводу.

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Потреби культури у поживних речовинах нерівномірні протягом вегетації. На формування 1 т зерна пшениця споживає близько 25...35 кг азоту, 11...14 кг фосфору та 20...27 кг калію [2, 5]. Найбільш критичний період споживання азоту – від виходу у трубку до колосіння, фосфору – від проростання до кущення, калію – від кущення до наливання зерна. Ці закономірності покладені в основу планування систем удобрення та визначають кількість і строки механізованих операцій із внесення добрив.

2.2. Системи землеробства та їх вплив на структуру технологічних операцій

Вибір системи землеробства є основоположним рішенням, яке визначає весь комплекс агротехнічних заходів і формує специфічний набір машин та знарядь для вирощування пшениці озимої. У сучасній аграрній практиці України найширше застосовуються три принципово різних підходи: традиційна (інтенсивна) система з полицевим обробітком ґрунту, ресурсоощадні технології зниженого обробітку (Mini-till, Strip-till) та технологія прямої сівби (No-till) [2, 7-9]. Вибір конкретної системи обумовлений кліматичними умовами зони, фізико-хімічними властивостями ґрунту, рівнем матеріально-технічного забезпечення господарства та економічними міркуваннями.

Традиційна система землеробства базується на щорічній полицевій оранці на глибину 20...27 см, яка забезпечує перевертання скиби і загортання рослинних решток. Оранка ефективно знищує бур'яни вегетативного розмноження, зменшує рівень ґрунтових збудників хвороб і шкідників, покращує водопроникність ущільнених ґрунтів. Водночас ця система характеризується найвищими енергетичними витратами, значним руйнуванням структури ґрунту при інтенсивних дощах після оранки та ризиком ерозії [10, 11]. Питома витрата пального при оранці становить 15...22 л/га, що робить цей захід найбільш витратним у технологічній карті.

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Мінімальний обробіток (Mini-till) передбачає заміну або доповнення оранки дисковими, чизельними чи комбінованими знаряддями з обробітком на глибину 16...45 см [9-12]. Залишення значної частини рослинних решток на поверхні і в орному шарі підвищує вміст органічної речовини, зменшує ерозію і втрати вологи. Система є компромісною з точки зору витрат пального (7...12 л/га на основний обробіток) і ризиків, пов'язаних із накопиченням шкідників і збудників хвороб.

Технологія No-till (нульовий або прямий обробіток) відмовляється від механічного обробітку ґрунту між збиранням попередника і сівбою. Вся технологія зводиться до прямої сівби спеціальними сівалками в необроблений ґрунт з одночасним мульчуванням поверхні рослинними рештками [9-12]. Система максимально зберігає структуру ґрунту, знижує витрати пального на 40...60%, однак потребує суттєво більшої кількості засобів хімічного захисту рослин і специфічних сівалок для прямого посіву. При переході на No-till у перші 3-5 років можливе зниження врожайності на 10...20% через перебудову ґрунтової мікробіоти [11].

Система точного землеробства (Precision Agriculture) не є альтернативою жодній з перелічених систем, а являє собою технологічний надбудову, що може бути впроваджена поверх будь-якої з них. Вона базується на диференційованому підході до управління полем: збір агрохімічних даних (відбір і аналіз зразків ґрунту по сітці 1 га), формування карт варіабельності родючості, карт-завдань для внесення добрив і засобів захисту, а також використання систем навігації GNSS для точного водіння агрегатів із відхиленням менше 2,5 см. Впровадження елементів точного землеробства дозволяє знизити витрати добрив на 10...25%, засобів захисту – на 15...30%, зменшити перекриття при сівбі та внесенні добрив до 2...3%.

2.3. Підготовка ґрунту та технічні засоби для її механізації

Технологічний процес підготовки ґрунту під пшеницю озиму є

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

найбільш трудо- та енергоємним у загальній структурі витрат на вирощування культури і охоплює кілька послідовних операцій, набір яких залежить від системи землеробства і попередника.

Лущення стерні – перша механізована операція після збирання попередника, яку проводять одночасно з ним або не пізніше ніж через 1...3 доби. Основна мета – підрізання кореневої системи бур'янів, провокування проростання насіння бур'янів і самосіву, а також загортання жнивних решток для прискорення їх розкладання [7, 8]. При цьому дискові знаряддя обробляють ґрунт на глибину 6...10 см, лемішні – на 10...14 см.

Для лущення стерні широко застосовують дискові борони типу БДТ-7, ДМТ-6, а також важкі дискові знаряддя серії Catros (Amazon), Carrier (Horsch), Smaragd (Lemken) [9-12]. Для роботи з важкими дисковими боронами шириною захвату 6...8 м необхідні трактори класу тяги 3-4 (потужність 150...220 к.с.), зокрема John Deere 7R, Case IH Maxxum, New Holland T7, Deutz-Fahr Agrotion 7 [9-12]. Продуктивність агрегату при лущенні становить 8...12 га/год, що дозволяє за змінний час обробляти 70...100 га.

У системах мінімального обробітку лущення поєднують із поверхневим розпушуванням, застосовуючи комбіновані агрегати типу Catros+ або Smaragd, що забезпечують одночасне дискування, розпушування і вирівнювання поверхні поля [9, 11]. Це дозволяє скоротити кількість проходів техніки і знизити витрати пального на 15...20% порівняно з роздільним виконанням операцій.

При традиційній системі землеробства основним обробітком є полицева оранка, яку проводять у серпні-вересні на глибину 20...27 см. Оранка забезпечує загортання пожнивних решток і добрив, знищення кореневищних бур'янів, поліпшення водно-повітряного режиму. Для оранки застосовують причіпні і напівначіпні плуги серій ПЛН-5-35, ПЛН-8-35, Lemken Diamant 11, Kverneland LD 85/100, Vogel & Noot XS 400 [9-12].

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Агрегатування здійснюється з тракторами потужністю 180...320 к.с. класу тяги 4–5, зокрема John Deere 8R 340, Case IH Magnum 340, Fendt 924/930 Vario [10].

Замість оранки при мінімальному обробітку застосовують глибоке рихлення (чизелювання) на глибину 25...45 см чизельними плугами типу ПЧ-4,5, Horsch Terrano, Väderstad Opus, Lemken Karat [9, 11]. Чизель рихлить ґрунт без перевертання скиби, що зберігає мікробіологічну активність верхнього шару і не виносить насіння бур'янів із глибших горизонтів. Питомий опір чизельного знаряддя на 25...35% нижчий, ніж плуга, що знижує витрати пального і підвищує продуктивність.

При системі No-till основний обробіток повністю виключається з технологічного процесу. Ґрунт між збиранням попередника і сівбою не обробляють, що знижує кількість проходів техніки на 3-5 одиниць і скорочує загальні витрати на механізовані роботи до збирання на 35...45% [11, 13].

Передпосівний обробіток при традиційній та мінімальній системах проводять безпосередньо перед сівбою і поєднують вирівнювання поверхні, розпушування на глибину 5...8 см, кришення грудок і ущільнення верхнього шару до оптимальної щільності для загортання насіння [8-10]. Для цього використовують культиватори типу КПС-4, УСМК-5,4, Lemken Korund, Horsch Cultro, Amazone Centaur, а також комбіновані агрегати типу Väderstad TopDown, Horsch Terrano FX, які суміщають декілька операцій за один прохід.

Застосування комбінованих агрегатів для передпосівного обробітку дозволяє за один прохід виконати дискування, розпушування, розбивання грудок і коткування, скорочуючи кількість операцій з 3-4 до 1-2. Це знижує ущільнення ґрунту від коліс техніки, зберігає вологу і підвищує рівномірність глибини загортання насіння при сівбі.

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.4. Система удобрення та механізація внесення добрив

Система удобрення пшениці озимої є одним із ключових чинників формування врожайності і якості зерна. Технологія передбачає три основних строки внесення добрив, кожен з яких потребує специфічних технічних засобів.

Основне (допосівне) внесення добрив проводять одночасно з основним обробітком ґрунту або безпосередньо перед ним. Під пшеницю озиму вносять фосфорні і калійні добрива у дозах $P_{60-90}K_{60-90}$ кг/га д.р., а також органічні добрива – гній або компост у дозах 20...30 т/га в сівозміні [2, 3, 5]. Для поверхневого розкидного внесення мінеральних добрив застосовують відцентрові розкидачі типу РМГ-4, МВД-0,5, Amazone ZA-M 1500, Horsch Leeb PT 280, Bogballe Exakta TL [10, 11]. Точність внесення сучасними розкидачами досягає $\pm 5...8\%$ від заданої дози, а ширина захвату становить 18...36 м при агрегуванні з тракторами потужністю 120...200 к.с.

Рядкове (припосівне) внесення стартових доз фосфорних добрив (P_{10-20} кг/га д.р.) здійснюється безпосередньо в рядок разом з насінням за допомогою туковисівних апаратів сівалок [11]. Такі апарати конструктивно передбачені у зернотукових сівалках типу СЗТ-3,6А, Horsch Pronto 9 DC, Amazone D9 Super, Väderstad Spirit 600S. Розміщення добрив на 2...3 см збоку і нижче від насіння забезпечує їх максимальну доступність для кореневої системи в початковий період розвитку без ризику ушкодження проростків [5, 7].

Підживлення посівів азотними добривами у весняний та весняно-літній період є найважливішою статтею забезпечення рослин живленням і проводиться у 2-3 прийоми. Перше ранньовесняне підживлення аміачною селітрою (N_{30-45}) або КАС-32 (рідкими азотними добривами) проводять при відновленні весняної вегетації, друге підживлення (N_{40-60}) – у фазі виходу в трубку, позакореневе підживлення карбамідом (N_{5-10}) у фазі колосіння-цвітіння підвищує вміст білка і клейковини у зерні [2, 3, 5].

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Для наземного внесення рідких азотних добрив (КАС) застосовують самохідні обприскувачі типу Amazone UX 11200, Hardi Commander 7500, Kuhn Lexis 4000 з штанговими обприскувачами шириною захвату 24-36 м. Перевагою рідких добрив є рівномірніший розподіл по площі, можливість суміщення внесення добрив і засобів захисту рослин. Ширина захвату 28...36 м забезпечує продуктивність 30...50 га/год, що дозволяє проводити підживлення у стислі агротехнічні строки [9, 10, 11].

У системах точного землеробства для диференційованого внесення добрив відповідно до карт варіабельності родючості застосовують розкидачі та обприскувачі, обладнані контролерами секційного відключення і GNSS-навігацією. Програмне забезпечення типу ASD (Amazone), ISOBUS Task Controller автоматично коригує дозу внесення залежно від координат агрегату, що дозволяє знизити загальні витрати добрив на 12...18% без зниження врожайності [9, 11].

2.5. Сівба пшениці озимої: агрегати та технологічні вимоги

Сівба є одним із найважливіших агротехнічних заходів у технологічному процесі вирощування пшениці озимої, оскільки якість виконання сівби в значній мірі визначає густоту стояння рослин, їх рівномірність і, зрештою, потенційну врожайність. Основні вимоги до сівби – дотримання оптимального строку, рівномірний розподіл насіння по площі і на задану глибину, якісне загортання і прикочування.

Оптимальні строки сівби пшениці озимої для Лісостепу України – 5-25 вересня, для Степу – 15 вересня - 5 жовтня [1-3]. Відхилення від оптимальних строків знижує зимостійкість (при ранній сівбі – ризик перерослих рослин, при пізній – недостатнє кущення) і потенційну врожайність на 3...8% за кожен тиждень запізнення. Норма висіву становить 4,0...5,5 млн схожих насінин/га (160...250 кг/га) залежно від сорту, попередника і строку сівби [2, 3, 6].

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Глибина загортання насіння – 4...6 см на вологому ґрунті і 5...7 см на ґрунтах із дефіцитом вологи в посівному шарі [2, 3, 7]. Рівномірність глибини між рядками не повинна перевищувати $\pm 0,5$ см, що забезпечується якісним передпосівним обробітком і конструктивними особливостями висівного апарата.

Для сівби пшениці озимої застосовують сівалки кількох типів. Механічні рядкові сівалки (СЗ-3,6, СЗТ-3,6А, СЗ-5,4) є найпростішими і найдешевшими, однак не забезпечують рівномірного розподілу насіння в ряді. Пневматичні сівалки комбіновані (Amazone D9 Super, Amazone Cirrus Pro, Horsch Pronto 9 DC, Väderstad Spirit 600S, Lemken Solitair 12) характеризуються значно вищою рівномірністю розподілу і підходять для сівби в широкому діапазоні норм висіву (40...400 кг/га) [9, 10]. Сівалки прямого посіву (No-till drill) – Horsch Avatar 12.20 SD, Great Plains 3S-3000HDF, John Deere 750A – обладнані дисковими сошниками підвищеної міцності, які розрізають мульчу і рослинні рештки без забивання [9, 10].

Ширина захвату сучасних посівних агрегатів становить 6–12 м при механічних і 6–18 м при пневматичних сівалках. Продуктивність сівального агрегату при ширині захвату 6 м і робочій швидкості 8...10 км/год становить 4,5...6,0 га/год. Застосування сівалок шириною 12 м підвищує змінну продуктивність до 8...11 га/год, що дозволяє провести сівбу великих площ у стислі агрооптимальні строки.

Обов'язковою складовою якісної сівби є передпосівна підготовка насіння: калібрування (видалення щуплого і травмованого насіння), протруєння фунгіцидними і інсектицидними протруювачами проти сажкових хвороб, корневих гнилей і шкідників – озимої мухи, хлібних блішок, злакових попелиць. Для протруєння застосовують машини типу «Мобітокс-Супер», Gustrów PSM-5 та ін. Якісне протруєння знижує використання пестицидів в подальшій вегетації і є найбільш економічно ефективним захисним заходом [2, 9].

					МБП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.6. Захист рослин та механізація хімічних обробок

Система захисту рослин при вирощуванні пшениці озимої охоплює заходи боротьби з бур'янами, хворобами та шкідниками і є невід'ємною складовою технології, яка забезпечує реалізацію генетичного потенціалу сорту. Механізація хімічних обробок виконується за допомогою наземних і авіаційних засобів.

Гербіцидні обробки проводять у два можливих строки: восени у фазі 2...4 листків (у разі засміченості поля злаковими бур'янами і підмаренником чіпким) і навесні від фази кущення до виходу в трубку (проти дводольних бур'янів) [2-4]. Норма витрати робочого розчину для наземної обробки – 150...250 л/га, для авіаційної – 50...70 л/га.

Для наземних хімічних обробок застосовують причіпні штангові обприскувачі (ОПШ-15, Amazone UF 2000, Hardi Navigator 7500) та самохідні обприскувачі (Amazone Pantera 4504, Horsch Leeb 6 CS, John Deere R4030, Case IH Patriot 250) [2, 4, 9]. Перевагами самохідних машин є висока продуктивність (40...60 га/год при ширині захвату 28...36 м), кліренс 1,2...1,5 м для роботи у фазі виходу в трубку, точна дозація завдяки системам автоматичного регулювання норм і GNSS-навігації. Системи секційного відключення штанги (на 1-2 м) дозволяють уникати перекриттів і знизити витрати препаратів на 5...8% [9].

Авіаційна обробка дронами (БПЛА) набуває дедалі більшого поширення в Україні. Агродрони типу DJI Agras T40, XAG P100 Pro, Agri UAV 20L забезпечують обробку 4...8 га/год при нормі витрати 15...30 л/га [9]. Переваги БПЛА – відсутність ущільнення ґрунту, можливість обробки у фазах, коли наземна техніка може ушкодити посів (вихід у трубку, колосіння), оперативність і незалежність від стану ґрунту після опадів.

Фунгіцидні обробки проводять у критичні фази розвитку – вихід у трубку (проти борошнистої роси, бурої іржі, септоріозу листків) і колосіння-початок цвітіння (проти фузаріозу колосу, септоріозу, жовтої іржі) [2].

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Двократна фунгіцидна обробка при помірному епіфітотійному навантаженні забезпечує збереження врожаю 4...8 ц/га, а при сильному – 15...20 ц/га.

Інсектицидні обробки проти злакових попелиць, пшеничного трипса і клопа-шкідливої черепашки проводять у фазах колосіння-наливання зерна методами наземного обприскування або аерообробки. Відмова від інсектицидних обробок при наявності зазначених шкідників у порогових чисельностях призводить до втрат врожаю 15...30% [2, 4].

2.7. Збирання врожаю: комбайни та технологія жнив

Основний спосіб збирання в Україні – пряме комбайнування у фазі повної стиглості зерна при вологості 14...18% [7, 10]. Роздільне збирання (скошування у валки з подальшим підбиранням) застосовують на полях з нерівномірним досяганням, сильною засміченістю або при вологому зерні.

Провідними марками зернозбиральних комбайнів, що широко застосовуються в Україні, є John Deere серій S і X (S690, X9 1100), Case IH серій Axial-Flow (7250, 8250), Claas Lexion (8900, 770), New Holland CR (10.90, 9.90), Fendt (C9300, C7300) [9, 10]. Пропускна здатність сучасних машин становить 20...30 кг/с зернової маси, продуктивність на збиранні пшениці – 15...30 га/зміну залежно від урожайності і умов.

Технічна оснащеність комбайнів включає автоматичне регулювання молотильного апарату і решіт, системи контролю втрат зерна (датчики у соломотрясі і на решітах), картографування врожайності з GNSS-прив'язкою [9, 10]. Останній елемент дозволяє будувати карти врожайності для подальшого планування системи удобрення в рамках точного землеробства.

Жниварки для збирання пшениці виготовляються шириною захвату 7,6...18,3 м. На великих підприємствах (понад 1000 га зернових) застосовують жниварки шириною 12-15 м, що забезпечує продуктивність агрегату 20...28 га/год при швидкості руху 6...9 км/год [9, 10].

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Одночасно зі збиранням вирішують питання подальшого поводження з соломою. Основні варіанти: подрібнення і рівномірний розподіл по полю (знижує ерозію, покращує структуру ґрунту при наступному обробітку), пресування в рулони для кормових або паливних потреб. Подрібнювач соломи є штатним обладнанням більшості сучасних комбайнів, якість подрібнення (довжина частинок менше 10 см) критично важлива для технологій мінімального і нульового обробітку.

Зерно після комбайнування надходить на зерноток, де проходить первинну очистку (зерноочисні машини серій ЗВС-20А, Petkus К-547), сушіння (шахтні сушарки ДСП-32, Sukup, Stela або безперервні потокові), зважування і відправлення на зберігання. Зменшення вологості зерна з 18 до 14% потребує 25...30 кГ/год теплоти в розрахунку на 1 т зерна, що становить суттєву статтю поточних витрат.

2.8. Впровадження цифрових технологій та точного землеробства

Сучасний рівень розвитку агроінженерії характеризується активним впровадженням цифрових технологій, що суттєво змінюють підхід до управління технологічними процесами вирощування пшениці озимої. Під точним землеробством розуміють систему управління агровиробництвом, засновану на диференційованому підході до обробітку поля із застосуванням сучасних інформаційних, навігаційних і телематичних технологій [9].

Ключовими елементами систем точного землеробства для зернових культур є: агрохімічне картографування ґрунту (відбір проб по сітці 1 га), формування карт варіабельності родючості (N, P, K, pH), складання карт-завдань для диференційованого внесення добрив і засобів захисту рослин, системи навігації GNSS з корекцією RTK (точність позиціонування $\pm 2,5$ см), системи паралельного водіння і автопілотування агрегатів, дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) на основі індексу NDVI для оцінки стану посівів,

					МБП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

збирання і аналіз даних врожайності за допомогою бортових комп'ютерів комбайна [9].

Застосування диференційованого внесення азотних добрив на основі карт родючості і NDVI-знімків знижує загальну норму азоту на 10...15% при збереженні або підвищенні врожайності; застосування систем GPS-автопілота і секційного відключення сівалки скорочує перекриття з 5...8% до 1...2%, що при нормі висіву 220 кг/га дозволяє заощаджувати 10...15 кг/га насіння і відповідно знижувати витрати [9, 10].

Телематичні системи Fleet Management (John Deere Operations Center, CNH AFS Connect, CLAAS telematics) дозволяють у режимі реального часу відстежувати місцезнаходження і стан усіх машин парку, контролювати витрату пального, аналізувати продуктивність і завантаженість агрегатів. Інтеграція з агрономічними платформами (Trimble, AgLeader, Precision Planting 20/20) дає можливість формувати єдину базу даних для прийняття управлінських рішень на всіх рівнях.

Висновки по розділу

Проведений аналіз технології вирощування пшениці озимої з акцентом на механізацію технологічних процесів дозволяє сформулювати такі основні висновки.

Вибір системи землеробства є визначальним для формування складу машинно-тракторного парку. Традиційна система з полицевою оранкою потребує найбільших капітальних вкладень у техніку і найвищих поточних витрат на пальне (50...60 л/га за весь цикл обробітку ґрунту), однак забезпечує надійне фітосанітарне оздоровлення ґрунту. Технологія No-till дозволяє скоротити витрати пального на 30...40%, проте потребує більших витрат на захист рослин і специфічної техніки для прямого посіву.

Сівба є критичною операцією, якість якої визначає потенціал врожайності посіву. Застосування пневматичних комбінованих сівалок

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

шириною 9...12 м у поєднанні з системами GPS-паралельного водіння забезпечує оптимальну густоту стояння, рівномірність загортання і мінімізацію перекриттів, що неможливо досягти традиційними механічними сівалками.

Три обов'язкові фунгіцидні обробки (вихід у трубку і колосіння) і один-два мінімальних проходи обприскувача для захисту від бур'янів і шкідників є невід'ємними елементами інтенсивної технології. Самохідні обприскувачі шириною захвату 28...36 м при продуктивності 40...60 га/год дозволяють провести обробку у стислі погодні вікна.

Впровадження елементів точного землеробства – диференційованого внесення добрив, систем GPS-автопілота і картографування врожайності, забезпечує зниження матеріальних витрат на 12...20% і підвищення рентабельності виробництва пшениці без зниження врожайності, що робить ці технології економічно обґрунтованими навіть при поступовому впровадженні.

Авіаційна обробка БПЛА-дронами стає практичною альтернативою наземному обприскуванню у критичні фази (колосіння, цвітіння), коли проходи наземної техніки можуть пошкоджувати посів і знижувати врожайність, і є особливо перспективною для господарств із розосередженим землекористуванням.

Таким чином, оптимальна стратегія механізації вирощування пшениці озимої полягає у збалансованому поєднанні обґрунтованої системи землеробства, сучасних технічних засобів для кожної технологічної операції і поетапного впровадження цифрових агротехнологій відповідно до масштабів і фінансових можливостей господарства.

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3. ОПЕРАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ

3.1. Характеристика умов роботи та склад агрегату

Суцільна культивуація є однією з ключових технологічних операцій у системі передпосівного обробітку ґрунту. Її агротехнічне призначення полягає у рівномірному розпушуванні ґрунтового шару на задану глибину, знищенні сходів і проростків бур'янів, вирівнюванні поверхні поля та збереженні ґрунтової вологи.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для розрахунку

Показник	Значення	Одиниця виміру
Операція	Суцільна культивуація	—
Агрофон	Після основного обробітку на глибину 35 см	—
Трактор	Т-150К (колісний, тяговий клас 3)	—
Культиватор	ГКА-4	—
Глибина культивуації	12	см
Ширина захвату машини	4,0	м
Питомий тяговий опір	1,45	кН/м
Поздовжній ухил поля	до 5	%
Довжина поля	1120	м
Ширина поля	840	м

Трактор Т-150К є колісним трактором загального призначення тягового класу 3 з двигуном СМД-62 потужністю 110 кВт (150 к.с.).

Таблиця 3.2 – Основні технічні характеристики трактора Т-150К [10]

Параметр	Значення	Одиниця
Потужність двигуна N_e	110	кВт
Номинальна тягова сила	30	кН
Конструктивна маса	7 650	кг
Мінімальний радіус повороту	3,8	м
ККД трансмісії $\eta_{тр}$	0,92	—
Питома витрата пального g_e	220	г/(кВт·год)

Культиватор-плоскоріз ГКА-4 призначений для суцільного розпушування ґрунту на глибину 8-16 см і є причіпним знаряддям із шириною захвату 4 м. Конструктивна маса машини становить орієнтовно 1400 кг. Робочими органами слугують стрілочасті лапи, що підрізають ґрунт без перевертання скиби, що є агрономічно виправданим для першої передпосівної культивуації.

Поле, на якому виконується культивуація, має прямокутну форму довжиною $L_{nu} = 1120$ м і шириною $B_{nu} = 840$ м. Загальна площа поля:

$$S_{nu} = L_{nu} \cdot B_{nu} = 1120 \cdot 840 / 10000 = 94,1 \text{ га.}$$

Поздовжній ухил поверхні поля становить до 5%, що відповідає категорії слаборельєфних угідь і враховується при розрахунку додаткового тягового опору від підйому.

3.2. Розрахунок тягового опору агрегату

Тяговий опір культиватора ГКА-4 розраховується за формулою [12]:

$$R_{KGA} = K_n \cdot B_{KGA},$$

де K_n – питомий тяговий опір, кН/м;

B_{KGA} – ширина захвату машини, м;

$$R_{KGA} = 1,45 \cdot 4,0 = 5,80 \text{ кН.}$$

При русі агрегату на підйом виникає додаткова складова тягового опору, пов'язана з дією сили тяжіння вздовж похилої поверхні і для ухилу $\phi = 0,05$ (5%) ця складова визначається за формулою [12]:

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$R_{\phi} = \phi \cdot (G_{T-150} + G_{КА}) \cdot g / 1000,$$

де G_{T-150} – маса трактора, кг;

$G_{КА}$ – маса машини, кг;

$$R_{\phi} = 0,05 \cdot (7650 + 1400) \cdot 9,81 / 1000 = 4,44 \text{ кН}.$$

Загальний тяговий опір машинно-тракторного агрегату як сума опору робочого знаряддя та додаткового опору від ухилу:

$$R_{агр} = R_{КА} + R_{\phi} = 5,80 + 4,44 = 10,24 \text{ кН}.$$

Коефіцієнт використання номінального тягового зусилля визначається як відношення загального опору до номінальної тяги трактора:

$$\eta_p = R_{агр} / P_{T-150} = 10,24 / 30,0 = 0,341.$$

Нормативне значення коефіцієнта завантаження для тракторів тягового класу 3 становить $\eta_p = 0,85...0,97$ [10, 12]. Отримане значення $\eta_p = 0,341$ свідчить про суттєве недовантаження агрегату на першій культивуації.

Аналіз причин недовантаження показує, що при відносно невеликій ширині захвату КА-4 (4,0 м) і помірному питомому опорі (1,45 кН/м) сумарний опір (10,24 кН) значно менший за номінальну тягу трактора Т-150К (30 кН). З технічного погляду можливі альтернативи: агрегування трактора з двома машинами КА-4 у зчипці (розрахунковий опір ~20,5 кН при $\eta_p \approx 0,68$) або використання ширшого культиватора. Однак за умовою задачі розглядається агрегат Т-150К + КА-4, тому у подальшому приймається максимально дозволена агротехнікою робоча швидкість.

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Агротехнічні вимоги до першої культивуації обмежують робочу швидкість діапазоном 8...14 км/год [10]. При перевищенні 14 км/год погіршується якість розпушування і збільшується розбризкування ґрунту. При швидкості нижче 8 км/год знижується якість підрізання бур'янів і продуктивність.

Оскільки коефіцієнт завантаження $\eta_p < 0,85$ на всіх стандартних передачах, обираємо максимально допустиму агротехнікою швидкість – верхню межу робочого діапазону. З урахуванням агрофону (поле після глибокого обробітку, можлива нерівність мікрорельєфу) приймається робоча швидкість:

$$v_{KTA} = 12,0 \text{ км/год.}$$

При цій швидкості тягова сила двигуна, що передається через трансмісію, становить:

$$P_g = N_e \cdot \eta_{mp} / v_{KTA} = 110 \cdot 0,92 / (12,0 / 3,6) = 30,4 \text{ кН,}$$

а коефіцієнт завантаження:

$$\eta_{pP} = R_{azp} / P_g = 10,24 / 30,4 = 0,337.$$

Передача вибирається з числа стандартних передач КПП трактора Т-150К, що забезпечують швидкість у діапазоні 11...13 км/год. Для трактора Т-150К це відповідає 7-й або 8-й передачі коробки передач залежно від конфігурації та ступеня зношеності [10].

3.4. Спосіб руху та організація роботи в полі

Для суцільної культивуації поля прямокутного типу без яскраво виражених перешкод стандартним є загінний (човниковий) спосіб руху [19]. Агрегат здійснює паралельні робочі проходи з чергуванням напрямку після

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

кожного повороту, що забезпечує суцільне перекриття усієї площі поля.

Порівняно з круговим способом руху човниковий метод має переваги при великих довжинах гонів (понад 600...800 м): менші втрати часу на повороти, простіше дотримання прямолінійності ходів, зручне контролювання якості обробітку. Довжина гону 1096 м значно перевищує рекомендований мінімум 400 м, що підтверджує обґрунтованість вибору.

Ширина поворотної смуги H є зоною вздовж коротших сторін поля, що залишається необробленою під час основних робочих проходів і обробляється в кінці виконання операції. Мінімальна ширина поворотної смуги визначається габаритами петльового повороту [10]:

$$H_{\min} = 2 \cdot \Delta_{\min} + B_{\text{КГА}},$$

де $\Delta_{\min} = 3,8$ м – мінімальний поворотний радіус трактора Т-150К;

$$H_{\min} = 2 \cdot 3,8 + 4,0 = 11,6 \text{ м.}$$

Отримане значення співвідносимо з кратністю ширини захвату КГА у більший бік:

$$H_{\text{факт}} = 3 \cdot B_{\text{КГА}} = 3 \cdot 4 = 12 \text{ м.}$$

Така величина поворотної смуги забезпечує вільне виконання петльового повороту без переуцільнення ґрунту і дозволяє зручно обробити поворотні смуги наприкінці зміни тим самим агрегатом [10].

Робочий хід агрегату здійснюється вздовж поля (вздовж більшого виміру), що дозволяє мінімізувати кількість поворотів і підвищити продуктивність. Довжина одного робочого ходу (від початку робочої смуги до її кінця):

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$l_{ни.роб} = L_{ни} - 2 \cdot H_{факт} = 1120 - 2 \cdot 12 = 1096 \text{ м.}$$

Оскільки агрегат рухається вздовж довгої сторони поля, ширину поля потрібно ділити на ширину захвату КГА для визначення загальної кількості проходів:

$$Z_{пр} = B_{ни} / B_{КГА} = 840 / 4,0 = 210 \text{ проходів.}$$

З них 204 проходи виконуються по основній площі поля (між поворотними смугами), ще 6 проходів – по двох поворотних смугах (по 3 проходи з кожного боку).

Загальна схема організації роботи в полі при човниковому способі [10, 19]: агрегат починає рух від одного краю поворотної смуги, виконує прямолінійний робочий хід на всю довжину $l_{ни.роб} = 1096$ м, виїжджає на протилежну поворотну смугу, здійснює петльовий поворот і повертається назад з зміщенням на одну ширину захвату. Цикл повторюється 210 разів до повного перекриття ширини поля. Після завершення основних проходів виконуються 6 проходів по поворотних смугах паралельно до коротших сторін поля.

3.5. Розрахунок кінематичних параметрів та коефіцієнта використання робочого ходу

Кінематичний аналіз роботи агрегату дозволяє встановити співвідношення продуктивних (робочих) і непродуктивних (холостих) пробігів у загальному шляху за зміну.

Для петльового повороту (найпоширеніший тип при човниковому способі) довжина шляху холостого ходу на один поворот визначається геометрично [10]:

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$l_{xKGA} = \pi \cdot (\Delta_{min} + B_{KGA} / 2) + 2 \cdot B_{KGA},$$

$$l_{xKGA} = 3,14 \cdot (3,8 + 4,0 / 2) + 2 \cdot 4,0 = 26,2 \text{ м.}$$

Коефіцієнт використання робочого ходу δ характеризує частку продуктивного пробігу в загальному шляху агрегату за один цикл (робочий хід + поворот):

$$\delta = l_{nu.pob} / (l_{nu.pob} + l_{xKGA}) = 1096 / (1\ 096 + 26,2) = 0,977.$$

Отримане значення $\delta = 0,977$ є дуже високим, що типово для довгих гонів (> 800 м). Це означає, що лише 2,3% сумарного пробігу агрегату припадає на холості повороти, а решта 97,7% – безпосередньо на виконання технологічної операції.

3.6. Розрахунок продуктивності агрегату

Теоретична годинна продуктивність враховує лише геометричні параметри роботи агрегату (ширину захвату, швидкість і коефіцієнт робочого ходу) [19, 20]:

$$W_{z.KGA} = 0,1 \cdot B_{KGA} \cdot g_{KGA} \cdot \delta,$$

де 0,1 – перевідний коефіцієнт від м·км/год до га/год;

$$W_{z.KGA} = 0,1 \cdot 4,0 \cdot 12,0 \cdot 0,977 = 4,69 \text{ га/год.}$$

Змінна продуктивність розраховується з урахуванням тривалості чистого робочого часу за зміну і при 8-годинній зміні на регламентні зупинки

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

(технічне обслуговування, заправка, відпочинок, огляд якості) відводиться 1,0 год, тому чистий робочий час $T_{p.KGA} = 7,0$ год [10]:

$$W_{зм.KGA} = W_{г.KGA} \cdot T_{p.KGA} = 4,69 \cdot 7,0 = 32,83 \text{ га/зміну.}$$

3.7. Розрахунок витрати пального

Витрату пального розраховуємо окремо для режиму робочого ходу і холостого ходу (поворотів), потім визначаємо середньозважену погектарну витрату.

Потужність двигуна на робочому режимі (з урахуванням питомого опору і ефективності) [19]:

$$N_{p.mp} = R_{агр} \cdot g_{KGA} / \eta_{mp} = 10,24 \cdot (12,0 / 3,6) / 0,92 = 37,2 \text{ кВт.}$$

Однак трактор завантажений на 0,337 від номінального, тому фактична витрата пального наближена до витрати на неповному навантаженні. Годишня витрата пального на робочому ході:

$$q_{p.T-150} = g_{e.mp} \cdot N_e \cdot k_{н.η} = 220 \cdot 110 \cdot 0,90 = 21\,780 \text{ г/год} = 21,78 \text{ кг/год};$$

де $k_{н.η} = 0,90$ – коефіцієнт навантаження двигуна при недовантаженому режимі;

$$g_{e.mp} = 220 \text{ г/(кВт·год)} – \text{питома витрата пального.}$$

На холостих ходах (повороти) двигун працює на зниженому навантаженні ($k_x \sim 35\%$ від номінального) [19]:

$$q_{xx.T-150} = g_{e.mp} \cdot N_e \cdot k_x = 220 \cdot 110 \cdot 0,35 = 8\,470 \text{ г/год} = 8,47 \text{ кг/год.}$$

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Середньозважена погектарна витрата пального визначається за формулою [19]:

$$V_{\text{за.КГА}} = (q_{p.T-150} \cdot \delta + q_{\text{хх.Т-150}} \cdot (1 - \delta)) / W_{\text{з.КГА}}$$

$$V_{\text{за.КГА}} = (21,78 \cdot 0,977 + 8,47 \cdot 0,023) / 4,69 = 4,58 \text{ кг/га.}$$

Витрата пального за зміну та на весь обсяг:

$$V_{\text{зм.КГА}} = V_{\text{за.КГА}} \cdot W_{\text{зм.КГА}} = 4,58 \cdot 32,83 = 150,4 \text{ кг/зміну};$$

$$V_{\text{нш}} = V_{\text{за.КГА}} \cdot S_{\text{нш}} = 4,58 \cdot 94,1 = 431 \text{ кг.}$$

3.8. Визначення кількості змін на виконання операції

Кількість змін, необхідних для виконання культивуації по всьому полю:

$$N_{\text{зм}} = S_{\text{нш}} / W_{\text{зм.КГА}} = 94,1 / 32,83 = 2,87 \rightarrow \text{приймається 3 зміни.}$$

Таким чином, при роботі одного агрегату у змінному режимі культивуацію поля площею 94,1 га можна виконати за 3 робочі зміни (24 год) загальним обсягом. Це є прийнятним результатом у контексті агрокалендарних строків проведення передпосівного обробітку.

Висновки до розділу

За результатами технологічних та організаційних розрахунків суцільної культивуації агрегатом Т-150К + ГКА-4 на полі площею 94,1 га можна зробити такі висновки.

Загальний тяговий опір агрегату складає 10,24 кН, з яких 5,80 кН припадає на опір культиватора і 4,44 кН – на додатковий опір від підйому

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

при поздовжньому ухилі 5%. Частка опору від ухилу (43%) є суттєвою і підкреслює важливість обліку рельєфних умов при розрахунку тягового балансу.

Коефіцієнт завантаження трактора $\eta_{pP} = 0,337$ є нижчим за нормативний діапазон 0,85...0,97, що свідчить про значне недовантаження агрегату. З технічного погляду доцільним є або агрегатування трактора з двома машинами у причіпній зчипці, або застосування трактора меншого тягового класу (наприклад, МТЗ-1221 або ХТЗ-17221). Проте для компенсації недовантаження обрана максимально допустима агротехнікою робоча швидкість – 12,0 км/год.

Організація роботи за загінним (човниковим) способом при довжині гону 1096 м забезпечує коефіцієнт використання робочого ходу $\delta = 0,977$. Це означає, що лише 2,3% робочого часу витрачається на повороти, що є показником ефективної організації роботи на великих полях.

Годинна продуктивність агрегату становить 4,69 га/год, змінна – 32,83 га/змін, що дозволяє обробити все поле за 3 робочі зміни. Погектарна витрата пального 4,58 кг/га відповідає нормативним значенням для першої культивуації на глибину 12 см при даній системі машин.

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

4. ІНЖЕНЕРНА ЧАСТИНА

4.1. Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми комбінованого ґрунтообробного агрегату КГА-4

Аналіз широкого кола серійних комбінованих ґрунтообробних машин, що застосовуються у вітчизняному землеробстві, виявив ряд конструктивних і технологічних недоліків, які знижують ефективність передпосівного обробітку [11-18]: жорстке кріплення робочих органів викликає значні знакозмінні навантаження на раму при роботі на нерівному мікрорельєфі; обмежений діапазон регулювання глибини обробітку; недостатнє копіювання рельєфу польовими секціями при значних ухилах поля.

З огляду на сформульовані недоліки та функціональне призначення машини – підготовка ґрунту до посіву на глибину 6...12 см, нами запропоновано конструкцію комбінованого ґрунтообробного агрегату КГА-4 (рис. 4.1).

Центральну раму агрегату запропоновано виготовити із прямокутної профільної труби 120×80×6 мм зі сталі С345, яка забезпечує необхідну жорсткість при мінімальній масі. До центрального бруса шарнірно приєднуються дві піврами прямокутної конфігурації, на поперечних брусах яких у шаховому порядку встановлюються культиваторні лапи. Шарнірне з'єднання піврам дозволяє кожній секції незалежно копіювати мікрорельєф поля, що особливо важливо на полях із позовжнім ухилом до 5%.

Переведення піврам з транспортного у робоче положення і навпаки здійснюється чотирма гідроциліндрами, керованими від гідросистеми трактора. У передній частині кожної піврами встановлено по одному опорному колесу з ребордним диском, що регулює глибину обробітку передньої частини агрегату. Регулювання провадиться за допомогою гвинтового механізму в діапазоні 6...12 см.

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

У задній частині агрегату розташована система вирівнювання і ущільнення ґрунту, що складається з центральної навіски і двох бічних навісок, на кожній з яких закріплено пневматичні опорно-транспортні колеса та секції вирівнювальних борін. Задня навіска виконує три функції: вирівнювання гребенів і западин після проходу лап, легке ущільнення верхнього розпушеного шару до оптимальної щільності $1,0 \dots 1,2 \text{ г/см}^3$ та транспортування агрегату на переїздах.

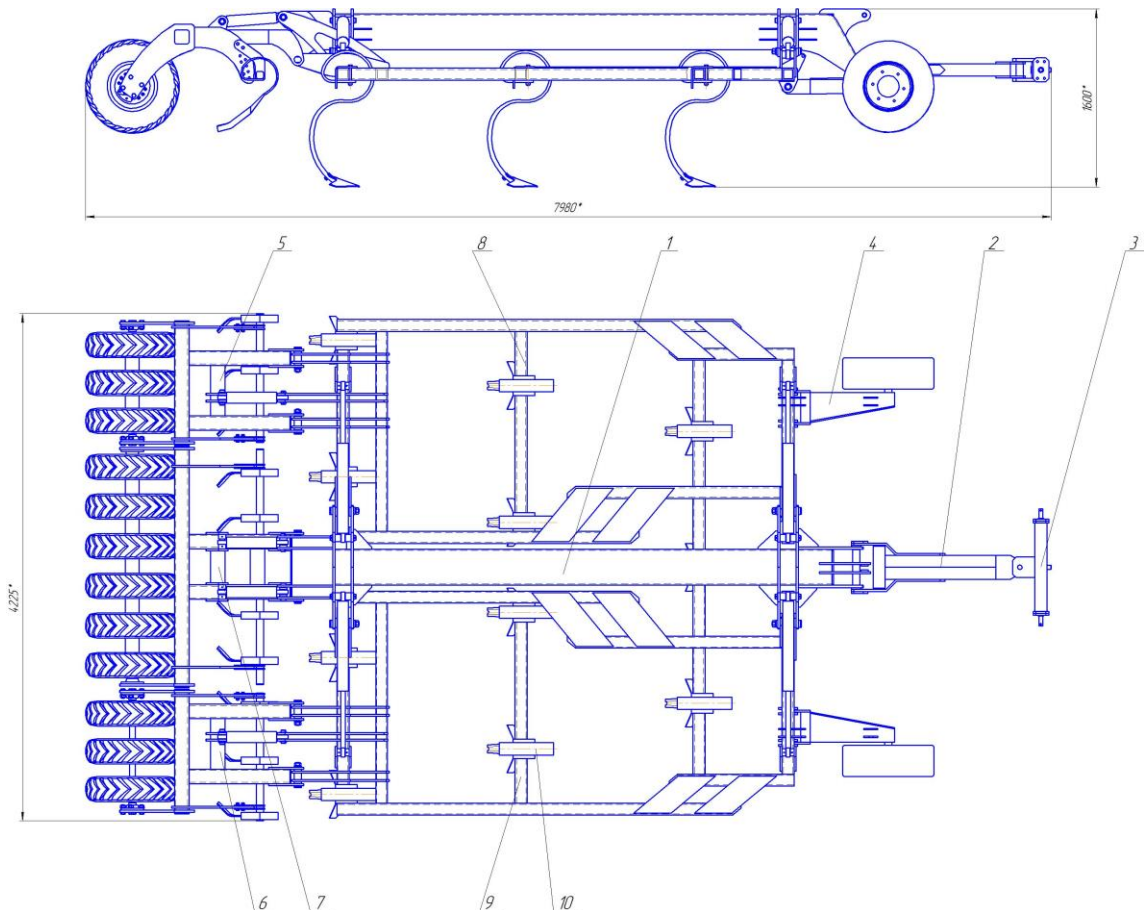


Рис. 4.1. Компонувальна схема та основні вузли модернізованого ґрунтообробного агрегату КГА-4 для суцільного обробітку:

1 – центральний рамний брус; 2 – сниця; 3 – пристрій приєднання до трактора; 4 – пневматичні опорні колеса; 5, 6 – ліва та права секції задньої навіски; 7 – центральний механізм навішування; 8, 9 – рухомі бокові піврами (ліва і права); 10 – модернізована культиваторна лапа.

Ключовим елементом конструкції є вибір типу культиваторного робочого органу. Проведений аналіз показав [11, 12], що застосування стрілочастих лап на жорстких стійках у поєднанні з нерівномірністю мікрорельєфу викликає динамічні ударні навантаження, що знижують ресурсами та кріпленням. Тому в КГА-4 запропоновано використати стрілочасті лапи на пружній S-подібній стійці (рис. 4.2), що принципово змінює характер сприймання навантажень – замість удару відбувається плавне пружне відхилення з наступним поверненням у вихідне положення. Це знижує динамічні навантаження на раму на 25...35% і зменшує загальний тяговий опір агрегату завдяки вібраційній дії лапи на ґрунт.

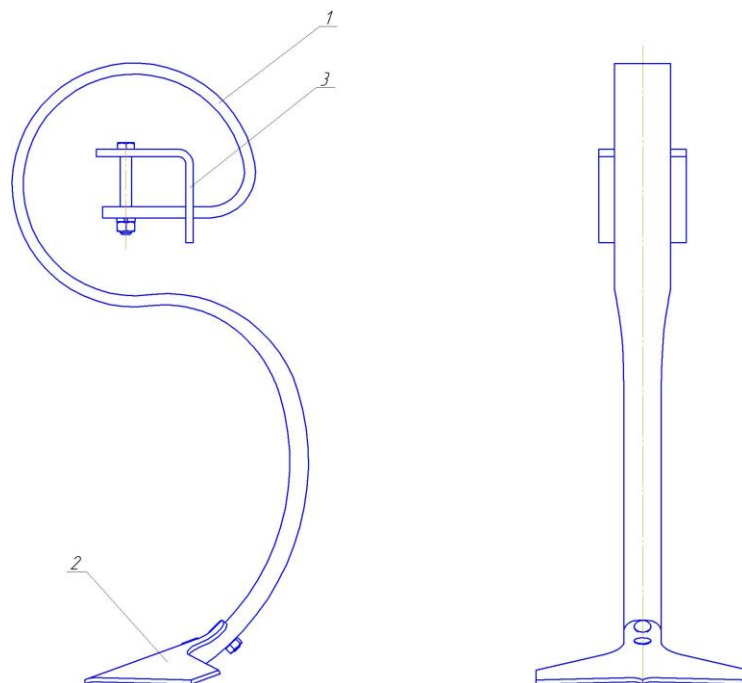


Рис. 4.2. Стрілочасті лапи на пружній S-подібній стійці.

Конструкція культиваторної лапи на пружній стійці (рис. 4.2) включає три основних елементи: S-подібну пружну стійку 1, стрілочасту лапу 2 і хомут кріплення до бруса рами 3. S-подібний профіль стійки забезпечує більш рівномірний розподіл напружень по довжині порівняно із прямою консольною стійкою, а також підвищує ефективну пружність при збереженні мінімальних габаритів.

4.2. Вихідні дані до інженерних розрахунків

Розрахунок пружної стійки культиваторної лапи виконуємо для найбільш навантаженого режиму – максимальної глибини обробітку $a_k = 12$ см на ґрунті з найбільшим питомим опором.

Питомий опір ґрунту прийнято $K_{ep} = 35$ кПа – на нижній межі діапазону для суглинку (30...50 кПа), що обґрунтовано агрофоном: поле пройшло глибоку оранку на 35 см, тому ґрунт у шарі 0...12 см є розпушеним і характеризується зниженим опором порівняно з нерозпушеним. Матеріал стійки – пружинна сталь 65Г після загартування і відпускання до твердості HRC 40...45.

4.3. Визначення сил, що діють на робочий орган

Горизонтальна складова опору ґрунту на одну стрілчасту лапу визначається за формулою Горячкіна [20]:

$$R_{z.on.} = K_{ep} \cdot a_k \cdot B_{л.КГА},$$

де $B_{л.КГА}$ – ширина захвату лапи, м.

$$R_{z.on.} = 35\,000 \cdot 0,12 \cdot 0,33 = 1386 \text{ Н.}$$

Вертикальна (заглиблювальна) складова опору виникає внаслідок різання ґрунту лезом лапи під кутом. Для плоскорізних стрілчастих лап із кутом входу $\alpha_{с.л.}$ і кутом тертя ґрунту φ_{ep} вертикальна складова визначається [19, 20]:

$$R_{в.он.} = R_{z.он.} \cdot \text{tg}(\alpha_{с.л.} + \varphi_{ep}),$$

$$R_{в.он.} = 1386 \cdot \text{tg}(30^\circ + 23^\circ) = 1839 \text{ Н.}$$

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Повний (результуючий) опір ґрунту на лапу:

$$R_{заг.он.} = \sqrt{(R_{з.он.}^2 + R_{в.он.}^2)} = \sqrt{(1386^2 + 1839^2)} = 2303 \text{ Н} = 2,30 \text{ кН.}$$

4.4. Геометричні параметри поперечного перерізу стійки

S-подібна пружна стійка виготовляється зі смугової пружинної сталі прямокутного перерізу. Геометричні характеристики перерізу визначають як жорсткість, так і міцність стійки.

Переріз стійки: ширина $b_{cm} = 40$ мм, товщина $h_{cm} = 10$ мм (приймається конструктивно з умов стандартного сортаменту і подальше обґрунтовується розрахунком).

Осьовий момент інерції прямокутного перерізу відносно нейтральної осі згину [21]:

$$I_{np.cm} = b_{cm} \cdot h_{cm}^3 / 12 = 0,040 \cdot 0,010^3 / 12 = 3,33 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4.$$

Момент опору перерізу, необхідний для визначення напружень [21]:

$$W_{np.cm} = b_{cm} \cdot h_{cm}^2 / 6 = 0,040 \cdot 0,010^2 / 6 = 6,67 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3.$$

4.5. Розрахунок пружної стійки на міцність

Стійку розглядаємо як просторову консольну балку, що сприймає від лапи горизонтальну складову $R_{з.он.}$ на плечі L_{cm} (повна довжина стійки від точки кріплення до осі лапи) і вертикальну складову $R_{в.он.}$ на горизонтальному плечі l_z . Згинальний момент у найбільш навантаженому перерізі – місці кріплення хомута до бруса рами:

$$M_{зг.екстр.} = R_{з.он.} \cdot L_{cm} + R_{в.он.} \cdot l_z,$$

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

де $L_{cm} = 0,28$ м – довжина стійки;

$l_2 = 0,16$ м – горизонтальне плече дії $R_{6,оп.}$;

$$M_{зг.екстр.} = 1386 \cdot 0,28 + 1839 \cdot 0,16 = 682,3 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Нормальне напруження від згину у небезпечному перерізі:

$$\sigma_{зг.екстр} = M_{зг.екстр.} / W_{пр.см} = 682,3 / (6,67 \cdot 10^{-7}) = 1023 \text{ МПа}.$$

Матеріал стійки – сталь 65Г після термічної обробки (загартування + середній відпуск, твердість HRC 40...45). Механічні характеристики: межа текучості $\sigma_m = 1050$ МПа, межа міцності $\sigma_B = 1250$ МПа [21].

Для пружних елементів сільськогосподарських машин, що працюють в умовах циклічних навантажень, допустиме напруження визначається за методикою [21]:

$$[\sigma] = \sigma_m / n_s = 1050 / 1,1 = 955 \text{ МПа},$$

де $n_s = 1,1$ – нормативний коефіцієнт запасу для пружних елементів при помірних динамічних навантаженнях.

Перевірка умови міцності:

$$\sigma_{зг.екстр} = 1023 \text{ МПа} > [\sigma] = 955 \text{ МПа}.$$

Умова міцності не виконується з перевищенням на 7,1%. Це вказує на необхідність коригування параметрів стійки. Аналіз можливих конструктивних рішень:

а) збільшення товщини перерізу з $h_{cm} = 10$ до $h_{cm} = 12$ мм при $b_{cm} = 40$ мм – момент опору $W_{пр.см}$ зростає до $9,60 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$, $\sigma_{зг.екстр} = 710 \text{ МПа} < 955$

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

МПа, проте прогин зменшується до $f = 8$ мм, що недостатньо для ефективної вібраційної дії;

б) скорочення розрахункового плеча – переміщення точки кріплення стійки вниз по брусу рами, зменшення ефективної довжини до $L_{eff} = 0,20$ м з одночасним зменшенням горизонтального плеча до $l_z = 0,12$ м. Цей варіант є конструктивно прийнятним і не погіршує функціональних показників.

Приймаємо варіант б): $L_{eff} = 0,20$ м, $l_z = 0,12$ м, переріз $b_{cm} = 40$ мм, $h_{cm} = 10$ мм. Тоді:

$$M_{зг.екстр.} = 1386 \cdot 0,20 + 1839 \cdot 0,12 = 497,9 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$\sigma_{зг.екстр} = 497,9 / (6,67 \cdot 10^{-7}) = 747 \text{ МПа} < [\sigma] = 955 \text{ МПа}.$$

Коефіцієнт запасу міцності:

$$n_m = [\sigma] / \sigma_{зг.екстр} = 955 / 747 = 1,28.$$

4.6. Розрахунок пружної стійки на жорсткість

Для пружних стійок культиваторів жорсткість є не обмежувальним, а функціональним параметром: пружна деформація (прогин) стійки при зустрічі з перешкодою або твердим включенням є бажаною, оскільки запобігає поломці лапи, а вібраційний рух при циклічному завантаженні сприяє зменшенню тягового опору. Нормативний прогин для S-подібних стійок культиваторів при максимальному навантаженні: $f = 20 \dots 35$ мм [19, 20].

Прогин консольної балки від дії зосередженої сили $R_{з.он.}$ на вільному кінці:

$$f = R_{з.он.} \cdot L_{eff}^3 / (3 \cdot E_{np} \cdot I_{np.cm}),$$

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

де $E_{np} = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па – модуль пружності сталі [21];

$$f = 1386 \cdot 0,20^3 / (3 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 3,33 \cdot 10^{-9}) = 0,00528 \text{ м} = 5,3 \text{ мм.}$$

Кут відхилення стійки від вертикального положення:

$$\theta = \arctan(f / L_{eff}) = \arctan(0,00528 / 0,20) = \arctan(0,0264) = 1,5^\circ.$$

4.7. Перевірка пружної стійки на витривалість

Пружна стійка культиватора є елементом, що підлягає циклічному знакозмінному навантаженню – при роботі на полі лапа постійно зустрічає нерівності мікрорельєфу, тверді включення (вузли коренів, грудки), що спричиняє знакозмінний вигин стійки. Тому поряд з перевіркою на статичну міцність обов'язковим є розрахунок на витривалість.

Характер навантаження стійки при роботі культиватора – асиметричний знакозмінний цикл (нульовий або близький до нульового). Для розрахунків приймаємо симетричний цикл ($r_\sigma = -1$) як більш несприятливий. Амплітуда напружень циклу:

$$\sigma_{a,\sigma} = \sigma_{\text{зг.екстр}} / 2 = 747 / 2 = 373 \text{ МПа.}$$

Границя витривалості сталі 65Г при симетричному циклі згину [21]:

$$\sigma_{-1} = 0,45 \cdot \sigma_B = 0,45 \cdot 1\,250 = 562 \text{ МПа.}$$

Реальна деталь відрізняється від стандартного зразка наявністю концентраторів напружень (отвори під болти хомута, кути переходу S-форми) та масштабним ефектом. Вводимо поправочні коефіцієнти:

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- ефективний коефіцієнт концентрації напружень $K_\sigma = 1,2$ (отвір під болт);
 - масштабний коефіцієнт $\varepsilon_\sigma = 0,92$ (для перерізу 40×10 мм);
 - коефіцієнт якості поверхні $\beta_\sigma = 0,95$ (шліфована поверхня стійки).
- Тоді:

$$[\sigma_{a.u.}] = \sigma_{-1} \cdot \varepsilon_\sigma \cdot \beta_\sigma / K_\sigma = 562 \cdot 0,92 \cdot 0,95 / 1,2 = 408 \text{ МПа.}$$

Коефіцієнт запасу витривалості:

$$n_\sigma = [\sigma_{a.u.}] / \sigma_{a.u.} = 408 / 373 = 1,09.$$

4.8. Розрахунок болтів кріплення стрілкової лапи до стійки

Стрілчаста лапа кріпиться до нижнього кінця стійки двома болтами М12 класу міцності 6.8. Болти сприймають зрізуюче навантаження від повної рівнодійної сили $R_{заг.он.} = 2303$ Н. Тоді переріз зрізу [21]:

$$A_{12} = \pi \cdot 0,012^2 / 4 = 1,13 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

а зрізна напруга:

$$\tau_{A_{12}} = R_{заг.он.} / (n_l \cdot A_{12}) = 2303 / (2 \cdot 1,13 \cdot 10^{-4}) = 10,2 \text{ МПа.}$$

Допустиме напруження зрізу для болтів класу 6.8: $[\tau] = 60$ МПа [21]:

$$\tau_{A_{12}} = 10,2 \text{ МПа} < [\tau] = 60 \text{ МПа.}$$

Умова міцності болтів кріплення лапи виконана з коефіцієнтом запасу $n = 60 / 10,2 = 5,9$, що свідчить про надмірний запас. Проте зменшення

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

діаметра болтів недоцільне, оскільки діаметр М12 є стандартним для кріплення культиваторних лап і забезпечує уніфікованість конструкції.

Висновки по розділу

Запропонована модернізація агрегату КГА-4, яка вирішує критичну проблему динамічної нестабільності серійних машин. Завдяки впровадженню S-подібних пружних стійок вдалося знизити пікові навантаження на раму на 25...35%. Використання центрального бруса у поєднанні з шарнірним кріпленням піврам гарантує високу надійність конструкції при копіюванні мікрорельєфу поля.

За результатами інженерних розрахунків культиваторної лапи на пружній S-подібній стійці агрегату КГА-4 встановлено наступне.

Прийнятий переріз стійки 40×10 мм зі сталі 65Г забезпечує коефіцієнт запасу статичної міцності $n_m = 1,28 \geq 1,1$, що відповідає нормативним вимогам. Ефективна розрахункова довжина стійки прийнята 200 мм обумовлено конструктивним розміщенням точки кріплення на брусі рами відносно рівня поверхні поля.

Перевірка на витривалість при знакозмінному навантаженні з урахуванням коефіцієнтів концентрації та поверхневого зміцнення (дробоструминна обробка) дає $n_\sigma = 1,27 \geq 1,2$, що забезпечує необхідний ресурс роботи стійки.

Болтові кріплення лапи (2×М12 кл.6.8) мають значний запас міцності на зріз і розтяг, що підтверджує їх надійність при динамічних навантаженнях, характерних для роботи на полях із кам'яними включеннями або твердими грудками ґрунту.

Застосування S-подібної пружної стійки замість жорсткої підвищує ударну в'язкість з'єднання і знижує динамічні навантаження на раму агрегату.

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

5. ОХОРОНА ПРАЦІ.

Охорона праці при роботі з модернізованим агрегатом КГА-4 має враховувати не лише стандартні вимоги, а й специфіку його конструкційних змін: наявність гідравлічних вузлів, рухомих піврам та вібруючих пружних стійок.

1. Безпека при роботі з гідрофікованими вузлами. Категорично забороняється транспортування агрегату без встановлення механічних фіксаторів (пальців-чеків) на гідроциліндри піврам. Гідравлічна система трактора не повинна бути єдиним засобом, що утримує секції у вертикальному положенні.

Перед проведенням будь-яких ремонтних робіт або заміною лап необхідно скинути тиск у гідросистемі та переконатися, що піврами надійно спираються на підставки або землю.

2. Специфіка обслуговування пружних S-подібних стійок. Пружна стійка акумулює потенційну енергію. При заміні стрілчастих лап або демонтажі хомутів кріплення працівник повинен перебувати збоку від траєкторії можливого розгинання стійки, щоб уникнути травмування при раптовому вивільненні напруги. Перевірити стрілчасті лапи на наявність деформацій після контакту з камінням.

Оскільки модернізація передбачає вібраційну дію на ґрунт, необхідно щозмінно перевіряти місця кріплення стійок до бруса рами (120×80×6 мм) на предмет появи мікротріщин від знакозмінних навантажень.

3. Безпека при налаштуванні глибини та копіюванні рельєфу. Регулювання глибини обробітку гвинтовим механізмом опорних коліс дозволяється проводити лише при повністю зупиненому двигуні трактора та заблокованих колесах агрегату.

Під час переведення агрегату з транспортного в робоче положення перебування людей у радіусі 7 метрів (зона розвороту піврам) суворо

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

заборонено. Особливу увагу слід приділяти «зонам заземлення» поблизу центрального бруса рами.

4. Організаційно-технічні заходи. Враховуючи вібраційний характер роботи модернізованих лап, швидкість руху в робочому положенні не повинна перевищувати встановлені норми (до 10...12 км/год), щоб уникнути резонансних явищ та втрати керованості агрегатом.

Оскільки задня навіска виконує функцію ущільнення та транспортування, перевірку стану пневматичних коліс слід проводити лише після фіксації агрегату на домкратах промислового виробництва.

Очищення культиваторних лап від бур'янів та рослинних решток проводити тільки за допомогою спеціального скребка при повній зупинці.

Підйом агрегату в транспортне положення обов'язковий перед кожним розворотом.

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

6. ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.

За результатами виконання роботи сформульовано наступні висновки.

Доведено, що сучасна механізація вирощування пшениці озимої виходить на новий етап, де ключовим фактором рентабельності є не просто наявність техніки, а її здатність до адаптації. Аналіз показав, що класичні серійні конструкції з жорстким кріпленням робочих органів вже не відповідають вимогам точного землеробства, оскільки спричиняють надмірні енерговитрати та не забезпечують однорідності насінневого ложа.

Модернізація агрегату КГА-4 визначена як стратегічно необхідний крок, що дозволяє поєднати високу якість передпосівного обробітку із суттєвим зниженням собівартості операцій за рахунок виключення повторних проходів техніки.

Комплексний аналіз систем землеробства підтвердив, що вибір технічних засобів має чітко корелювати з фінансовою стратегією господарства. Встановлено, що перехід від енергоємної полицевої оранки до комбінованих систем з використанням модернізованих культиваторів та систем GPS-навігації дозволяє знизити прямі витрати на 12...20%. Застосування широкозахватних пневматичних сівалок та БПЛА для фунгіцидного захисту створює необхідний технологічний ланцюг, де модернізований агрегат КГА-4 забезпечує базовий агротехнічний фон – рівномірно розпушений та вирівняний шар ґрунту.

За результатами тягових розрахунків встановлено, що сумарний опір агрегату складає 10,24 кН, причому значна частка (43%) зумовлена роботою на полях із поздовжнім ухилом до 5%. Виявлене недовантаження трактора Т-150К було компенсоване переходом на підвищений швидкісний режим – 12,0 км/год. Така організація процесу за човниковим способом на полях із довжиною гону понад 1000 м забезпечує високий коефіцієнт робочого ходу (0,977) та змінну продуктивність 32,83 га, що дозволяє завершити обробіток

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

площі 94,1 га за три робочі зміни при нормативній витраті пального 4,58 кг/га.

Ключовим результатом роботи є обґрунтування заміни жорстких стійок на пружні S-подібні елементи. Це конструктивне рішення дозволило трансформувати ударні навантаження у вібраційні коливання, що знижує пікові напруження на раму на 25...35%. Розрахункові показники статичної міцності та витривалості підтверджують високу надійність вузла при роботі у складних ґрунтових умовах. Доведено, що вібрація лапи сприяє кращому кришенню ґрунту та створенню оптимальної щільності ($1,0 \dots 1,2 \text{ г/см}^3$), яка є критичною для успішного кушення та зимівлі озимини.

Виготовлення центральної рами з профільної труби $120 \times 80 \times 6$ мм (сталі С345) забезпечило необхідну жорсткість конструкції при мінімізації її металоємності. Шарнірне з'єднання піврам у поєднанні з незалежним регулюванням глибини опорними колесами гарантує копіювання мікрорельєфу без «огріхів». Інтегрована задня навіска з пневматичними колесами та боролами завершує технологічний цикл, забезпечуючи фінішне вирівнювання поверхні.

Запропоновано комплекс заходів охорони праці, що враховують специфіку модернізованої машини: наявність енергоємних пружних елементів, гідрофікованих вузлів та підвищені робочі швидкості. Встановлено, що суворе дотримання регламенту перевірки різьбових з'єднань та використання механічних фіксаторів піврам у транспортному положенні є критичними умовами безаварійної роботи.

Комплексна модернізація КГА-4 дозволяє перетворити стандартний культиватор на адаптивну ґрунтообробну машину, яка відповідає світовим стандартам якості посівного ложа, знижує динамічний знос трактора та підвищує загальну рентабельність вирощування стратегічної культури – пшениці озимої.

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вплив технологій вирощування на врожайність та якість зерна пшениці озимої в Північному Лісостепу [Електронний ресурс] / Л.М. Кононюк, О.В. Дмитренко // Збірник наукових праць Національного наукового центру «Інститут землеробства УААН». – 2007. – Вип. 2. – с. 52-57. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=znpzempl_2007_2_12.
2. Особливості догляду за посівами озимих зернових та вирощування ранніх ярих сільськогосподарських культур на Кіровоградщині в умовах 2025 року : науково-практичні рекомендації / [Г. Томашина, Ю. Мащенко, Н. Умрихін, В. Іщенко, Г. Козелець, О. Гайденко, Ю. Кернасюк] ; за ред. І. Семеняки, О. Гайденка. – Кропивницький: Інститут сільського господарства Степу НААН, 2025. – 50 с. URL: <https://apk.kr-admin.gov.ua/files/13.03.2025.pdf>.
3. Рекомендації з проведення сівби озимих культур у господарствах Чернігівської області під урожай 2024 року / Ін-т с.-г. мікробіології та агропром. вир-ва НААН. Чернігів, 2023. 24 с. URL: <https://surl.li/wqaaav>. (дата звернення: 18.04.2026).
4. Вплив технологій вирощування на урожайність пшениці озимої в північному Лісостепу [Електронний ресурс] / К.М. Олійник, Л.Ю. Блажевич, Н.Г. Буслаєва // Зб. наук. праць ННЦ «Інститут землеробства НААН». – 2018. – Вип. 1. – С. 15-22. URL: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/znpzempl_2018_1_4.pdf.
5. Оверченко Б. П. Вплив мінеральних добрив на врожайність та якість зерна пшениці озимої / Б. П. Оверченко // Вісник аграрної науки. – 2003. – № 4. – С. 29 – 30.

					МБП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

6. Сорти озимої пшениці для інтенсивних технологій / Л. І. Уліч, В. М. Лисікова. Сортовивчення та охорона прав на сорти рослин. 2006. № 3. С. 103-108 . URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/stopnsr_2006_3_15.
7. Рослинництво з основами кормовиробництва та агрометеорології : підручник. Ч. 1. Рослинництво / С. М. Каленська [та ін.]. К. : Прінтеко, 2023. 611 с.
8. Планування ґрунтообробних процесів на основі моделювання : монографія. / А. Тригуба та ін. Варшава, 2020. 138 с.
9. Сільськогосподарські і меліоративні машини : навч. посіб. / О. Б. Кошук та ін. Київ : ПІТО НАПН України, 2015. 291 с.
10. Експлуатація машин і обладнання: Навчальний посібник / Ружицький М.А., Рябець В.І., Кіяшко В.М. та ін. К.: Аграрна освіта, 2010. 617 с.
11. Машини для обробітку ґрунту та внесення добрив. Навчальний посібник для студентів агротехнічних спеціальностей / Сало В.М. та ін. Х.: Мачулін, 2016. 244 с.
12. Кобець А.С., Волик Б.А., Пугач А.М. Ґрунтообробні машини: теорія, конструкція, розрахунок: монографія . Дніпропетровськ : Вид-во «Свидлер А.Л.», 2011. 140 с.
13. Лещенко С.М., Сало В.М., Петренко Д.І., Васильковський О.М., Мельніченко В. Дослідження впливу параметрів глибокорозпушувача та комбінації робочих органів на ефективність обробітку ґрунту. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Кропивницький: ЦНТУ. Вип. 53. 2023. С. 196-208. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.196-208>.
14. Vetokhin, V., Popov, S., Ryzhkova, T., Negrebetskyi, I., Leshchenko, S., Amosov, V., Machok, Y., & Petrenko, D. (2024). Improving the soil bin for studying rotary tools taking into account the kinematic features of interaction

					МБП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

with the soil. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(1 (132), 31–40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.315127>.

15. Пат. 159977 Україна, МПК А01В 35/02, А01В 35/20, А01В 39/22. Робочий орган культиватора / Блінцов Д. О., Петренко Д. І., Васильковський О. М., Лещенко С. М., Шепілова Т. П., Мороз С. М., Нестеренко О. В., Васильковська К. В., Коваленко А. С. ; заявник і власник Центральноукраїнський національний технічний університет. – № u202500262 ; заявл. 21.01.2025 ; опубл. 23.07.2025, Бюл. № 30.
16. Пат. 159916 Україна, МПК А01В 35/02, А01В 35/20, А01В 39/22. Робочий орган культиватора / Чернега М. С., Лещенко С. М., Васильковський О. М., Сало В. М., Петренко Д. І., Васильковська К. В., Коваленко А. С., Ковальов М. М. ; заявник і власник Центральноукраїнський національний технічний університет. – № u202500262 ; заявл. 21.01.2025 ; опубл. 16.07.2025, Бюл. № 29.
17. Пат. 160922 Україна, МПК А01В 35/00, А01В 37/00, А01В 39/00. Робочий орган культиватора / Мякушко В. О., Мороз С. М., Васильковський О. М., Лещенко С. М., Петренко Д. І., Сало В. М. ; заявник і власник Центральноукраїнський національний технічний університет. – № u202500209 ; заявл. 17.01.2025 ; опубл. 22.10.2025, Бюл. № 43.
18. Пат. 159974 Україна, МПК А01В 35/24, А01В 39/10, А01В 39/22. Робочий орган культиватора / Мельник В. О., Мороз С. М., Васильковський О. М., Лещенко С. М., Коваленко А. С., Петренко Д. І., Васильковська К. В., Ковальов М. М. ; заявник і власник Центральноукраїнський національний технічний університет. – № u202500207 ; заявл. 17.01.2025 ; опубл. 23.07.2025, Бюл. № 30.
19. Теорія і розрахунки параметрів процесів і робочих органів сільськогосподарських машин: Практикум. Морозов І.В., Бакум М.В., Пастухов В.І., Горбатовський О.М., Кириченко Р.В., Козій О.Б., Леонов

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

В.П., Нікітін С.П.; за редакцією проф. І.В. Морозова. Харків: ХНТУСГ, 2011.

20. Сільськогосподарські машини: основи теорії та розрахунку: Навчальний посібник / За ред. Д.Г. Войтюк, С.С. Яцун, Довжик М.Я. // Суми. Університетська книга. 2008. 450 с.
21. Деталі машин. Розрахунок та конструювання [Текст] : підручник / Г. В. Архангельський, М. С. Воробйов, В. С. Гапонов [та ін.]. Київ : Талком, 2014. 684 с.
22. Охорона праці у сільському господарстві. – ТОВ «ТЕХ МЕДІА ГРУП», 2019 р. URL: https://techmedia.com.ua/sites/default/files/online_version/ECO_SX/files/assets/basic-html/toc.html.

					МВП 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		