

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

СМИК ВІКТОР СЕРГІЙОВИЧ

УДК 631.31:631.372

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**РОЗРОБКА НАВІСНОГО СЕКЦІЙНОГО ПЛУГА
ЗІ ЗМІННОЮ ШИРИНОЮ ЗАХВАТУ**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Смик В.С.

Керівник роботи

Білецький В.Р.

кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Смик Віктор Сергійович. Розробка навісного секційного плуга зі змінною шириною захвату. – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

У магістерській роботі вирішено науково-прикладну задачу підвищення експлуатаційно-технологічних показників орних агрегатів шляхом розробки навісного секційного лемішно-відвального плуга зі змінною шириною захвату. На основі аналізу існуючих орних агрегатів встановлено недоліки традиційних багатокорпусних плугів, пов'язані зі значним збільшенням їх довжини при зростанні ширини захвату. Запропоновано принципову схему плуга з розміщенням корпусів у кілька паралельних секцій, що дало змогу забезпечити змінну ширину захвату в діапазоні 3,8–6,08 м за відносно компактних габаритів. Теоретичними та експериментальними дослідженнями доведено, що розроблений плуг забезпечує раціональне завантаження трактора John Deere 9630 на глибинах обробітку 0,18–0,30 м, відповідає основним агротехнічним вимогам до якості оранки та характеризується задовільними показниками продуктивності й енергоємності. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та впровадженні перспективних орних агрегатів для підвищення ефективності основного обробітку ґрунту.

Ключові слова: плуг, ширина захвату, секція, робочий орган, оранка, обробіток ґрунту.

ANNOTATION

Smuk Viktor Serhiiovych. Development of a mounted sectional plow with variable working width. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering.
– Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

In the master's thesis, a scientific and applied problem of improving the operational and technological performance of tillage units is solved through the development of a mounted sectional mouldboard plow with a variable working width. Based on an analysis of existing tillage units, the drawbacks of conventional multi-bottom plows associated with a significant increase in their length as the working width increases were identified. A conceptual design of the plow with the arrangement of working bodies in several parallel sections is proposed, which made it possible to ensure a variable working width in the range of 3.8–6.08 m while maintaining relatively compact overall dimensions. Theoretical and experimental studies have proven that the developed plow provides rational loading of the John Deere 9630 tractor at tillage depths of 0.18–0.30 m, meets the basic agrotechnical requirements for plowing quality, and is characterized by satisfactory productivity and energy consumption indicators. The obtained results can be used in the design and implementation of advanced tillage units to improve the efficiency of primary soil tillage.

Keywords: plow, working width, section, working body, plowing, soil tillage.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ. МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	8
РОЗДІЛ 2. СХЕМА НАВІСНОГО СЕКЦІЙНОГО ПЛУГА ЗІ ЗМІННОЮ ШИРИНОЮ ЗАХВАТУ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	24
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	30
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	37

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. У технології виробництва сільськогосподарських культур значне місце займає основний обробіток ґрунту. Він закладає «фундамент» майбутнього урожаю.

Найбільш енергоємною операцією в рослинництві є підготовка ґрунту до посіву, на яку витрачається до 40% всієї споживаної енергії. У Україні для виконання операцій з ґрунтом використовуються орні агрегати, що складаються з тракторів потужністю 200-250 кВт і багатокорпусних плугів, з'єднаних по навісній, напівнавісній або причіпній схемі.

При послідовному ступінчастому розташуванні корпусів плуги мають велику довжину і масу, що впливають на експлуатаційно-технологічні показники орних агрегатів: зростають розміри поворотних смуг і час холостих поворотів; ускладнюється копіювання рельєфу поля і відбувається нерівномірна обробка ґрунту по глибині. Виникають проблеми при виглибленні і заглибленні, стійкості і надійності. Велика довжина навісних плугів значно збільшує навантаження на задній міст трактора і знижує безпеку орного агрегату.

Зменшити довжину багатокорпусних плугів можливо шляхом розміщення корпусів не на одній секції, а на декількох паралельних секціях і застосуванням корпусів плугів з низьким питомим опором, розроблених в Поліському національному університеті. Для завантаження тракторів на встановленій агротехнічними вимогами швидкості руху, конструкція секційного плуга повинна змінюватися по ширині захвату.

Таким чином, розробка навісного багатокорпусного секційного плуга зі змінною шириною захвату, що забезпечує раціональне завантаження трактора в діапазоні агротехнічно допустимих швидкостей руху, є актуальною науково-технічною задачею, що має важливе господарське значення.

Метою проведених досліджень є поліпшення експлуатаційно-технологічних показників роботи орних агрегатів шляхом розробки навісного

секційного плуга зі змінною шириною захвату для агрегування з тракторами потужністю 200-250 кВт.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких наукових завдань:

1. Провести аналіз експлуатаційно-технологічних показників орних агрегатів, що складаються з тракторів потужністю 200-250 кВт і лемешно-відвальних плугів загального призначення.

2. Розробити технологічний процес основної обробки ґрунту та обґрунтувати конструктивно-технологічну схему навісного секційного плуга зі змінною шириною захвату.

3. Провести експериментальні дослідження технологічного процесу основної обробки ґрунту, що виконується навісним секційним плугом із змінною шириною захвату.

Об'єктом дослідження є технологічний процес основної відвальної обробки ґрунту, що виконується навісним секційним плугом зі змінною шириною захвату, оснащеним пристосуваннями для вирівнювання поверхні ріллі.

Предметом дослідження є закономірності зміни продуктивності орних агрегатів і якості обробки ґрунту при взаємодії навісного секційного плуга з оброблюваним шаром ґрунту.

Методи наукового дослідження. Методологія базується на системному підході, який дозволяє розкрити сутність об'єкта досліджень. Теоретичні дослідження виконувалися з використанням основних положень класичної механіки та теорії експлуатації машинно-тракторних агрегатів. Експериментальні дослідження проводилися відповідно до чинних ДСТУ. Результати оброблені з використанням статистичних методів та програм персонального комп'ютера.

Перелік **публікацій** за темою роботи:

1. Сенчило М.В., Смик В.С. Умови та технології самозагострювання робочих органів ґрунтообробних машин. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 86-90.

2. Ільченко А.В., Лисюк О.А., Смик В.С. Аналіз способів відновлення робочих органів ґрунтообробних знарядь і підвищення їхнього ресурсу. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. С. 601-605.

3. Лисюк О., Сенчило М., Смик В. Білецький В. Основні види робочих органів, що застосовуються на ґрунтообробних знаряддях та їх конструктивні особливості. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. С. 98-102.

Практичну інтерес для аграрних підприємств України представляє конструкція розробленого плуга.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 26 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 39 сторінок комп'ютерного тексту, містить 21 рисунок та 2 таблиці.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ. МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Агротехнічні вимоги, що пред'являються до основної обробки ґрунту

Основний обробіток ґрунту – це комплекс механічних операцій (оранка, розпушування, культивація тощо), спрямованих на підготовку ґрунту для сівби та розвитку рослин. Він полягає у зміні структури орного шару з метою створення оптимальних водно-повітряних, теплових і поживних режимів ґрунту. Завданнями основного обробітку є формування пухкого ґрунтового ложа, покращення аерації, прискорення прогрівання ґрунту, інтенсифікація мікробіологічних процесів і кругообігу поживних речовин, знищення та загортання бур'янів, хвороб і шкідників, внесення та загортання добрив і післяжнивних решток, а також захист ґрунту від водної й вітрової ерозії. Умови проведення робіт залежать від кліматичної зони: у вологих регіонах підхід спрямований на поліпшення дренажу та прогрівання ґрунту, а в посушливих – на збереження і накопичення вологи (зокрема за рахунок мульчування поверхні). Агротехніка основного обробітку також враховує попередник культури, склад ґрунту та потреби наступної культури (сівозміна). Наприклад, після стерньових попередників часто проводять лушення стерні для подрібнення пожнивних залишків і вирівнювання поверхні, а власне оранка (плугова або безплужна) виконується у ґрунтово-зерновитий період на оптимальну глибину, що вказана в технології вирощування.

Оранка плугом – це традиційний глибокий обробіток, при якому ґрунт перекладається пласта на повну глибину (зазвичай 20–30 см) за допомогою оборотного плуга. Оранка забезпечує повне перемішування верхніх шарів ґрунту: рослинні рештки, пожнивні залишки й добрива заносяться на потрібну глибину, а родючий верхній шар піднімається вгору. Це сприяє знищенню

коренепаросткових бур'янів, патогенів і личинок ґрунтових шкідників, оскільки вони глибоко загортаються під рівень проростання. Завдяки повному обертанню пласта орна земля вирівнюється, утворюється однорідне насінневе ложе, знижується ступінь ущільнення поверхневого шару (руйнується плужна підшва). При цьому важливо підтримувати сталість глибини обробітку (відхилення не більш ніж $\pm 1-2$ см) та рівномірність проводки плуга по полю. Оскільки при оранці відбувається посилене кришіння ґрунту, вона зазвичай проводиться при оптимальній вологості (не вище ≈ 25 %) — щоб уникнути «залипання» ґрунту і забезпечити його розпушення. Систематична зміна глибини оранки або чергування плужної і безплужної обробітку допомагає запобігти утворенню ущільнених шарів.

Чизелювання – це глибоке безплужне розпушування ґрунту на значну глибину (зазвичай 25–40 см) із збереженням на поверхні значної частини стерні та поживних решток попередників. При чизелюванні ґрунт розпушується лапами-лемішами, але не перевертається, тому на поверхні залишається мульчуючий шар із рослинних решток. Такий обробіток покращує водно-повітряний режим ґрунту: він розбиває ущільнення, збільшує капілярність і проникність ґрунту, не дає ґрунту сильно злежуватись. Оскільки рослинні рештки не заносяться під ґрунт, вони поступово перегнивають на поверхні, віддаючи ґрунту поживні речовини у результаті аеробної мінералізації і підтримуючи родючість.

Чизелювання застосовують як у посушливих регіонах (для економії вологи та запобігання ерозії), так і в більш зволжених (для розпушування важких ґрунтів). Воно особливо ефективне в зонах, схильних до вітрової або водної ерозії: розпушена смуга ґрунту затримує опади, а рослинні рештки на поверхні захищають ґрунт від руйнування від дощу і вітру. Глибоке розпушування допомагає зруйнувати суцільну плужну підшву, що запобігає дефляції й посиленню заболочування зволжених шарів. Використання глибокорозпушувачів (чизелів) в агротехнології визнається енергоощадним та

природозахисним заходом: на відміну від оранки воно вимагає меншого енергоспоживання, адже ґрунт не перевертається, а також скорочує кількість проходів техніки по полю. Внесення глибокорозпушувачів сприяє накопиченню ґрунтової вологи та зростанню врожайності: дослідження показали, що у порівнянні з оранкою чизелювання забезпечує збереження вологи і захист від ерозії, що дозволяє значно збільшити врожайність зернових культур.

Для ще глибшого розпушування (понад 40–45 см) застосовують щілювання – безплужний обробіток за допомогою стійок-щілильників. Він виконує такі ж функції, що й чизелювання, але глибшає ґрунт до 50–60 см і більше, що корисно на сильно ущільнених землях та в посушливих умовах. Після розпушування обов'язково проводять вирівнювання поверхні і підготовку ложа для посіву (наприклад, коткування).

Мінімальний обробіток (min-till) і нульовий обробіток (no-till) – це технології ґрунтозахисного землеробства, що передбачають сильне зменшення або повну відмову від звичайної оранки. Мінімальний обробіток полягає у проведенні поверхневого культивування ґрунту на невелику глибину (зазвичай до 8–12 см), достатню лише для заробки добрив і гербіцидів та створення дрібногрудкуватого посівного ложа. При цьому більшість рослинних решток залишається на поверхні. Мінімізація кроків і глибини обробітку знижує енерговитрати, зменшує ерозійну небезпеку і зберігає більше вологи, що важливо у посушливих умовах. Цей спосіб доцільно застосовувати, наприклад, за високого рівня ґрунтових вод, на полях після бобових трав чи у посівах з міцним кореневим килимом (щоб не оголити ґрунт).

Нульовий обробіток (no-till) передбачає повну відмову від механічного перекопування ґрунту: сівба проводиться без попередньої оранки чи культивації, у пожнивні рештки попередніх культур. При цьому вся поверхня поля покривається мульчею з подрібнених решток, що захищає ґрунт від ерозії і зберігає вологу. Але сходи насіння в такому разі розвиваються в ущільненому ґрунті, тому цей метод вимагає спеціальної дискової або ножової сівалки і

застосування гербіцидного контролю бур'янів. No-till сприяє відновленню родючості поверхневого шару ґрунту природним шляхом і зменшує витрати на паливо та техніку. Проте ця система потребує ретельного дотримання сівозміни, точного нормування ЗЗР та може вимагати обладнання для гербіцидного захисту рослин (через накопичення бур'янів). Нульовий обробіток виправданий при достатньому зволоженні і високій родючості ґрунту, особливо після кукурудзи, соняшнику, цукрових буряків чи сорго, де важливо зберегти вологу і структуру ґрунту.

Якість основного обробітку значною мірою залежить від дотримання агротехнічних вимог: оптимальної вологості ґрунту, заданої глибини та рівномірності обробітку, чистоти поля від сторонніх предметів. Наприклад, оранку зазвичай виконують на вологість ґрунту 15–22 % (по глибині до 25–30 см), щоб забезпечити кришення без налипання земляної грудки. Чизелювання і щілювання потребують трохи вищої вологості (до ~25 %) і менш ущільнених умов, адже із-за того, що ґрунт не перевертається, необхідно уникати «перемазування» ґрунту ґрунтовими масами. На всіх операціях важливо рівномірно підтримувати глибину обробітку (відхилення не більше ~1–2 см) та кут атаки знаряддя. Поле перед обробітком має бути очищене від великих каменів, незібраних куп соломи, гною чи інших перешкод, щоб не заважати роботі ґрунтообробної техніки і не зменшувати її ефективності. Наприклад, при плужній оранці на поверхні не повинно бути великих валків стерні; при чизелюванні та культивації слід вирівняти поле і знищити кореневища чагарників.

Крім того, вибір методу обробітку і його параметрів має відповідати характеристикам ґрунту. На важких глинистих ґрунтах доцільний глибокий безплужний обробіток (щоб запобігти перетворенню добрив і решток на «залізну кірку»), а на легких піщаних — зазвичай достатньо поверхневого (мілкового) обробітку. Згідно з рекомендаціями агрономів, глибока оранка (25–40 см) рекомендована для важких безструктурних ґрунтів, схильних до ущільнення, а

мілка оранка або поверхневий обробіток (6–16 см) ефективні на легких і середніх ґрунтах із доброю структурою. Мінімальний обробіток застосовують при близькому заляганні ґрунтових вод і в сівозмінах із багаторічними бобовими травами, тоді як нульова технологія виправдана за достатнього зволоження та високо родючих ґрунтах.

Основний обробіток істотно впливає на родючість ґрунту через зміну його структури і режимів. Глибока обробка (оранка, чизелювання) руйнує ущільнення, збільшує пористість і ємність ґрунту утримувати воду, що особливо важливо при дефіциті опадів. Наприклад, наукові дослідження у степовій зоні України показали, що оранка збільшувала запас доступної вологи в ґрунті на 13 мм порівняно з мілким дисковим обробітком. З іншого боку, безплужні технології (strip-till, no-till) сприяють накопиченню вологи та запобігають виснаженню ґрунту: смуговий обробіток накопичує і зберігає ґрунтову вологу в критичних фазах розвитку рослин, а також оптимізує температурний режим поверхневого шару.

Крім води, процеси обробітку впливають на аерацію й гумусообмін. Наприклад, чизелювання та залишення мульчі забезпечують переважно аеробне розкладання решток і покращують біологічну активність ґрунту (корисні мікроорганізми перетворюють органіку на мінеральні форми добрив). При цьому поліпшується структура ґрунту – формується стійка агрегатна структура, яка підвищує проникність коренів культурних рослин. Застосування глибокого безплужного обробітку часто призводить до утворення стійшої «багат шарової» структури ґрунту: найповерхневіший шар (мульча і розпушений ґрунт) добре зволожується, а нижчі шари залишаються щільними «підпором» для коріння. У сукупності такі агроприйоми підвищують родючість ґрунтів за рахунок кращого використання вологи, ефективнішої роботи ґрунтових біоценозів і оптимізації поживного режиму.

Основний обробіток є важливим засобом контролю бур'янів і ґрунтових шкідників. При глибокій оранці і чизелюванні бур'янисті трави вириваються

кореневищами і повністю загортаються в ґрунт, що значно знижує їх кількість у наступних посівах. Наприклад, поєднання глибокої оранки з застосуванням гербіцидів знизило забур'яненість посівів майже на 12–16 % порівняно з мінімальними заходами контролю. При глибокому обробітку також заглиблюються патогени (спори грибів, личинки шкідників) на рівень, небезпечний для їх виживання. Одночасно при оранці виникає своєрідне «стерилізуюче» ефект: останнє тракторне проходження знищує дорослі стадії ґрунтових комах і переорює їхні яйця на непідходящу глибину.

Натомість за мінімального або нульового обробітку частина бур'янів залишається на поверхні або проростає крізь мульчу, що вимагає посиленого хімічного захисту. При відмові від оранки видовий склад бур'янів змінюється у бік багаторічних і стійких видів, тому в системах no-till особливу увагу приділяють своєчасному внесенню гербіцидів. Таким чином, агротехнічний вибір системи обробітку ґрунту безпосередньо пов'язаний із заходами захисту посівів: глибока технологія дозволяє значно знизити забур'яненість полів фізичними засобами, тоді як ґрунтозахисні технології потребують більш інтенсивних хімічних заходів.

Клімат України характеризується нерівномірним зволоженням і відносною посушливістю півдня і степової зони. У сучасних умовах глобального потепління агротехнічний обробіток ґрунту має враховувати зміни волого- та теплозабезпеченості. За дефіциту опадів в осінньо-зимовий період і високих літніх температур важливе значення набувають технології, що зменшують випаровування вологи (наприклад, no-till або смуговий обробіток). Водночас на півночі і заході України, де ґрунт більш вологий, інколи потрібніші звичайні оранка та суцільна культивування для швидшого висихання і прогрівання ґрунту навесні.

Так, сучасні наукові дослідження підтверджують: смуговий обробіток забезпечує найкраще накопичення вологи в ґрунті та енергозбереження порівняно з традиційними технологіями. Він створює локальні «ґрунтові смуги»

з підвищеною пористістю і мульчею, що особливо ефективно у посушливих умовах. Натомість поверхневий або безплужний обробіток призначений для областей із достатнім (або надлишковим) зволоженням і високою родючістю, де основна загроза – ерозія (у цьому випадку він сприяє відсіванню води у ґрунт і зниженню її втрат). Рекомендації фахівців узагальнено формулюють так: глибока обробка (25–40 см) потрібна на важких ґрунтах, що ущільнюються (особливо після кукурудзи, картоплі, соняшнику тощо), тоді як мілкий (6–16 см) і поверхневий (6–8 см) обробітки підходять для легких ґрунтів під озими та ярі зернові. Мінімальна технологія доречна при високому рівні ґрунтових вод і в посівах бобових культур, а no-till слід застосовувати за достатньої вологи і при збереженні мульчі (особливо в посушливих регіонах). При цьому строге дотримання послідовності заходів (сівозміни, своєчасності обробітку, боротьби з бур'янами) є надзвичайно важливим у контексті кліматичних викликів.

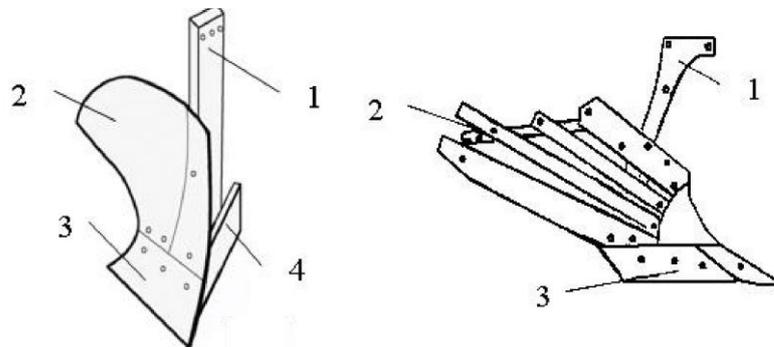
Отже, агротехнічні вимоги до основного обробітку ґрунту в Україні ґрунтуються на необхідності створення оптимальних умов для культурних рослин та збереження ресурсів. Вибір конкретних методів (плугова оранка, чизелювання, мінімальний чи нульовий обробіток) і параметрів обробітку має відповідати типовим ґрунтово-кліматичним умовам регіону та технологічним вимогам вирощуваної культури. Дотримання глибини, вологості та якості поля забезпечує поліпшення водно-повітряного режиму ґрунту, підвищення його родючості та ефективність захисту посівів від бур'янів і шкідників. Наукові дослідження й практичний досвід підтверджують, що сучасні екологічні та ресурсозберігаючі технології (смуговий обробіток, нульова оранка) дозволяють підвищити накопичення вологи, знизити ерозію і енерговитрати, водночас підтримуючи або збільшуючи врожайність культур. В умовах зміни клімату дотримання цих вимог є ключовим чинником збереження і підвищення продуктивності агроecosystem України.

1.2. Класичні лемешно-відвальні плуги загального призначення, що агрегатуються з тракторами потужністю 200-250 кВт

В даний час у світовій практиці для виконання оранки ґрунту застосовуються плуги, робочі органи яких виконуються за наступною принциповою схемою (рис. 1.1), при цьому елементи робочого органу можуть мати різні розміри [3, 9].

Такі робочі органи (корпуси) за ступінчастою схемою встановлюються на рами відомих плугів, що випускаються в Україні, а також далекому і ближньому зарубіжжі. Ці корпуси є класичними, і плуги, на які встановлюються ці корпуси, також можна назвати класичними [4, 11, 12].

Корпуси (рис. 1.1) використовуються в навісних, напівнавісних і причіпних плугах загального призначення. Ширина захвату таких корпусів становить 0,35-0,5 м, при цьому ширина відвалу може досягати 0,6-1,0 м. [3, 4].



Значним успіхом у плугобудуванні є розробка системи навісних плугів для агрегування з тракторами, оснащеними гідравлічними пристроями для підйому в транспортне положення плуга і опускання в робоче положення. Навісні плуги дозволили значно знизити масу плуга, спростити конструкцію, забезпечити високу маневреність і продуктивність оранного агрегату.

У Україні на підприємствах виробляються широко застосовувані навісні плуги зі ступінчастою схемою розташування корпусів марок ПНЛ-8-40 (рис. 1.2) і ПНІ-8-40 (рис. 1.3) та їх аналоги, які є модифікованими версіями цих плугів для агрегування з тракторами потужністю 200-250 кВт [45, 46].

Плуг ПНЛ-8-40 застосовується для оранки ґрунтів, які в подальшому будуть використовуватися для посадки зернових культур, таких як пшениця, ячмінь, овес. А також і технічних культур: буряк, бавовна, льон. Ґрунт не повинен мати перешкод у вигляді великих об'єктів, здатних пошкодити робочі органи, таких як камені, плитняк та інші. Ґрунт повинен відповідати агровимогам. Рекомендуємо для зчеплення з трактором тягового класу 5 і вище 5].



Рис. 1.2. Плуг навісний ПНЛ-8-40

Таблиця 1.1 – Технічна характеристика плуга ПНЛ-8-40

Показник	Значення показника
Робоча швидкість, км/год	до 10
Ширина захвату, м	
-плуга	3,2
-корпусу	0,4
Продуктивність за годину (при швидкості 8 км/год), га	
-основного часу	3,2
-експлуатаційного	2,56
Глибина, см:	
-оранки	до 30
-закладення рослинних залишків	12-15
Кількість корпусів, шт	8

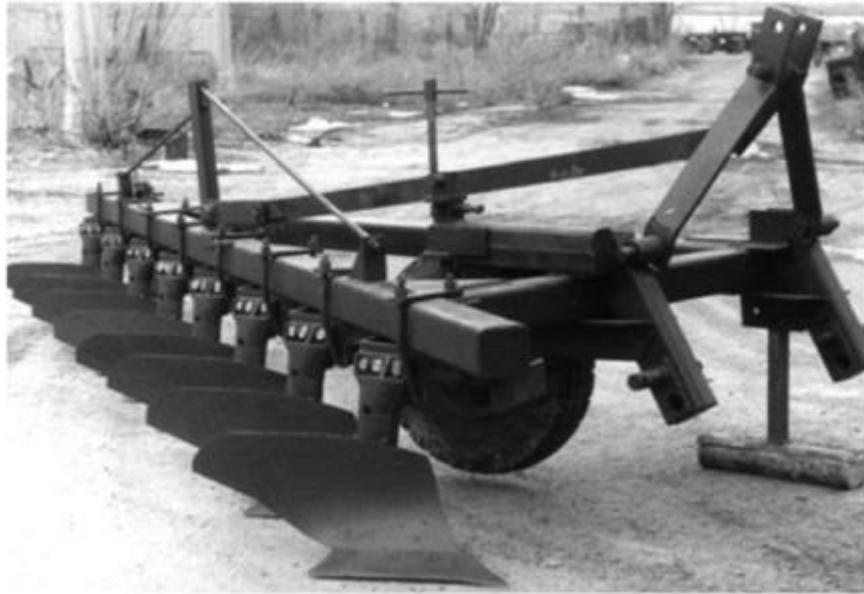


Рис. 1.3. Плуг з регульованою шириною захвату ПНІ-8-40

Таблиця 1.2. Технічна характеристика плуга ПНІ-8-40

Показник	Значення показника
Робоча швидкість, км/год	7
Ширина захвату, м	
-плуга	2,8-3,6
-корпусу	0,35-0,45
Кількість корпусів, шт	8
Продуктивність на годину (при швидкості 8 км/год), га	
-основного часу	2,44-2,88
-експлуатаційного	1,8-2,3
Максимальна глибина оранки, м	до
Габарити, мм: -довжина -ширина -висота	690 3550 1700
Маса, кг	2150

Плуг з можливістю зміни ширини захвату ПНІ-8-40, як і ПНЛ-8-40, призначений для оранки ґрунтів під зернові та технічні культури з такими самими вимогами до ґрунту. Конструкція плуга ПНІ-8-40 дозволяє трактористу виконувати безступінчасте регулювання ширини захвату в межах 2,8-3,6 м, змінюючи розстановку корпусів в поперечному напрямку.

Плуг ПНІ-8-40, як і ПНЛ, потрібно використовувати разом з тракторами тягового класу 5. Комплектування робочими органами для культурної оранки ґрунту дає можливість плугу працювати на швидкостях 7-10 км/год. Також сама конструкція рами дозволяє оснащувати плуг усіма видами корпусів під різні завдання експлуатації: безвідвальними, культурними, швидкісними, напівгвинтовими, смуговими.

Випробування плуга ПНІ-8-40 проводилися на відвальній обробці парів у весняно-літній період і зяблевій обробці ґрунту в літньо-осінній періоді. Глибина обробки встановлювалася 19,8-29,6 см відповідно до агрономог на ґрунті чорнозем звичайний важкосуглинковий в шарах 0-30 см 13,5-20,3; твердість ґрунту в шарах 0-30 см 0,50-1,28. Залежно від тягового опору регулювалася і ширина захвату. В якості енергетичного засобу використовувався трактор К-701.

Експлуатаційно-технологічна оцінка плуга ПНІ-8-40 проводилася на оранці парів.

результаті оцінки роботи агрегату швидкість склала трохи більше 8 км/год. Продуктивність за годину основного часу роботи агрегату - 2,61 га.

За результатами випробувань було встановлено, що ПНІ-8-40 виконує технологічний процес з належною якістю.

Безступінчасте регулювання ширини захвату плуга через різні умови оранки спільно зі зміною тягового опору дозволяє трактористу К-701 з плугом ПНІ-8-40 отримувати більш високі експлуатаційні показники, ніж з іншими напівнавісними плугами без можливості регулювання ширини.

Застосування кутових знімків замість передплужників дозволяє зменшити забивання корпусів і підвищує надійність виконання технологічного процесу обробки ґрунту [7].

Використовуючи вище викладене, можна зробити висновок, що застосовувані в Україні навісні широкозахватні плуги для основної оранки забезпечують продуктивність від 2,61 до 2,99 га/год, при цьому довжина плуга

знаходиться в межах від 6,9 до 7,08 м, ширина захвату: 3,2–3,62 м, а маса 2150 кг. Підвищення продуктивності агрегатів у складі тракторів потужністю 200-250 кВт і навісних плугів за рахунок збільшення ширини захвату призводить до збільшення маси і довжини плуга, при цьому погіршується зчеплення передніх коліс трактора з ґрунтом, а також підвищується ризик перекидання трактора, тобто знижується безпека оранного агрегату. Гранично допустима довжина для навісних плугів 7 м [2, 4, 9].

Слід зазначити, що в навісних плугах застосовують безступінчасте регулювання ширини захвату плуга.

Для зниження недоліків широкозахватних навісних плугів і підвищення продуктивності застосовують напівнавісні та причіпні плуги. Напівнавісні плуги, які використовуються в Україні, в основному виконуються за наступними схемами (рис. 1.4) [8, 9]:

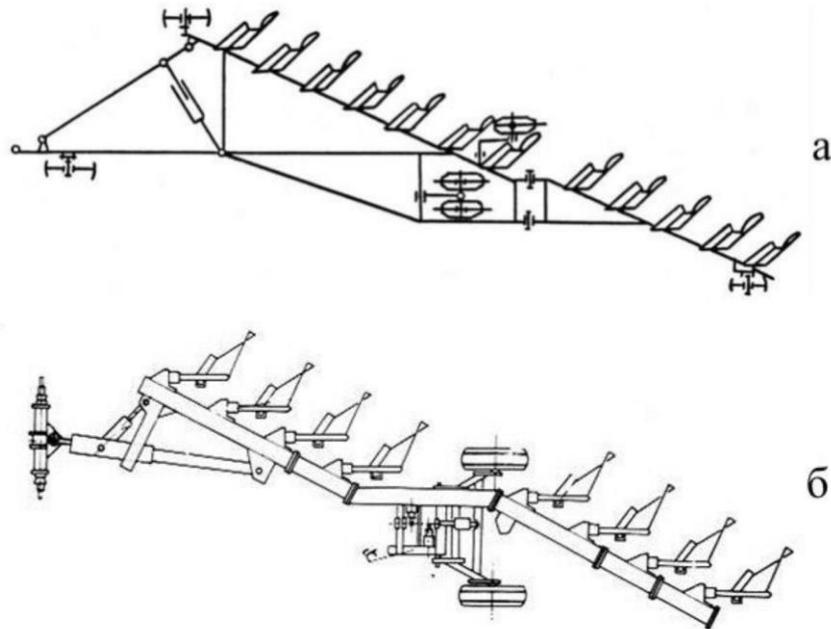


Рис. 1.4. Схеми багатокорпусних напівнавісних плугів з шарнірною рамою: а – 12-корпусний плуг ПШ-12-40М; б – 8-корпусний плуг фірми «KuhnHardt».

У канадській фірмі Salford розробляють і використовують широкозахватні причіпні плуги (рис. 1.5) [1, 2].



Рис. 1.5. Канадський причіпний плуг Salford 8214.

Плуги Salford починаючи з серії 8200 складаються з рами з двома секціями. Колеса мають можливість регулювання висоти за допомогою гідравліки. У серії 8300 додали можливість зміни ширини захвату плуга за допомогою гідравліки.

Дані плуги фірми salford, згідно з технічними характеристиками, мають значні показники довжини і маси. Висока металоємність, велика габаритна довжина, низька маневреність, наявність двох борозенних коліс, які ущільнюють дно борозен, знижують експлуатаційні характеристики оранного агрегату.

В даний час у багатьох країнах для основної обробки ґрунту використовують оборотні плуги. Робочі органи цих плугів складаються з двох класичних корпусів, один з яких має праве виконання, інший ліве (рис. 1.6) [3, 4].

Застосування таких робочих органів дозволяє поліпшити якість обробки ґрунту за рахунок отримання рівної поверхні поля без звальних або розвальних борозен. Відвали корпусів з шириною захвату до 1 м мають різну конструкцію і встановлюються на рами навісних, напівнавісних і причіпних плугів.



Рис. 1.6. Робочі органи оборотних плугів: зліва – цілісний відвал; праворуч – смуговий відвал

Для тракторів потужністю 200-250 кВт застосовують оборотні плуги в напівнавісному і причіпному виконанні.

Плуг напівнавісний оборотний EuroDiamant 10 7+1 L100 (рис. 1.7) використовується для обробки ґрунту. Призначений для підготовки ґрунту під зернові та технічні культури. Ґрунт не повинен мати перешкод у вигляді великих об'єктів, здатних пошкодити робочі органи, таких як камені, плитняк та інші. Для нормальної роботи агрегату питомий опір ґрунту не повинен перевищувати 0,09 МПа. Плуг призначений для роботи з тракторами тягового класу 5 [56].



Рис. 1.7. Загальний вигляд напівнавісного оборотного плуга EuroDiamant 10 7+1 L100

В результаті перевірки плуга Lemken EuroDiamant 10 7+1 L100 було встановлено його відповідність за питомими тяговими і потужними показниками тяговим і потужним характеристикам трактора класу 5. Плуг виконує технологічний процес обробки ґрунту зі швидкістю руху до 11,5 км/год.

Аналізуючи оборотні напівнавісні та навісні плуги, видно, що вони мають продуктивність 2,82 - 4,55 га/год, при ширині захвату 2,9 - 5,5 м. Довжина плугів знаходиться в діапазоні від 9,9 до 21,5 м, а маса 3400 - 9250 кг.

Велика довжина і маса напівнавісних і причіпних плугів є наслідком однорядного ступінчастого розміщення класичних корпусів на рамі, які мають високий тяговий опір, а відстань між корпусами по ходу руху плуга становить 0,8 - 1,2 м. При цьому значно знижується маневреність і надійність оранного агрегату [2].

Зі збільшенням ширини захвату і довжини плуга порушується копіювання рельєфу, що призводить до порушення стійкості по глибині обробки, знижується якість обробки ґрунту. Серйозні труднощі, в основному конструктивного характеру, виникають при створенні для широкозахватного плуга механізмів переведення в транспорт і механізмів транспорту [2].

Велика довжина плуга призводить до нерівномірної глибини оранки, проблем при заглибленні і виглибленні плуга [3].

З використанням широкозахватних багатокорпусних плугів, оснащених шарнірно-зчленованою рамою, необхідно зберегти рівномірне заглиблення передньої і задньої частини, а також забезпечити рівномірне копіювання рельєфу поля. Транспортний габарит необхідно вмістити в необхідних розмірах [4].

Висновки по розділу

Для оранки в Україні використовують агрегати, що включають трактори потужністю 200-250 кВт вітчизняного та зарубіжного виробництва і класичні

навісні, напівнавісні та причіпні плуги шириною захвату 3,2-5,05 м, довжиною 6,9- 21,5 м і масою до 9250 кг.

Секційне розташування корпусів забезпечує зменшення довжини, а також масу плуга в урівноваженні з плугами, у яких корпуси розташовані однорядної ступінчастої схемі поліпшити показники роботи оранного агрегату.

Перспективним напрямком підвищення ефективності оранних агрегатів є застосування в навісних секційних плугах зі змінною шириною захвату нових робочих органів.

РОЗДІЛ 2

СХЕМА НАВІСНОГО СЕКЦІЙНОГО ПЛУГА ЗІ ЗМІННОЮ ШИРИНОЮ ЗАХВАТУ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Конструктивно-технологічна схема навісного секційного плуга зі змінною шириною захвату

На підставі викладеного в розділі (2.1) можна зробити висновок, що навісний секційний плуг повинен забезпечувати різну глибину обробки ґрунту, при цьому для забезпечення раціонального завантаження орного агрегату необхідно змінювати ширину захвату плуга.

Зміна ширини захвату здійснюється шляхом зняття корпусів з рами плуга, при цьому при знятті двох корпусів ширина захвату плуга складе 5,32 м; чотирьох корпусів – 4,56 м; шести корпусів – 3,8 м. Зняття корпусів проводиться попарно з першої та четвертої секції плуга (рис. 2.1).

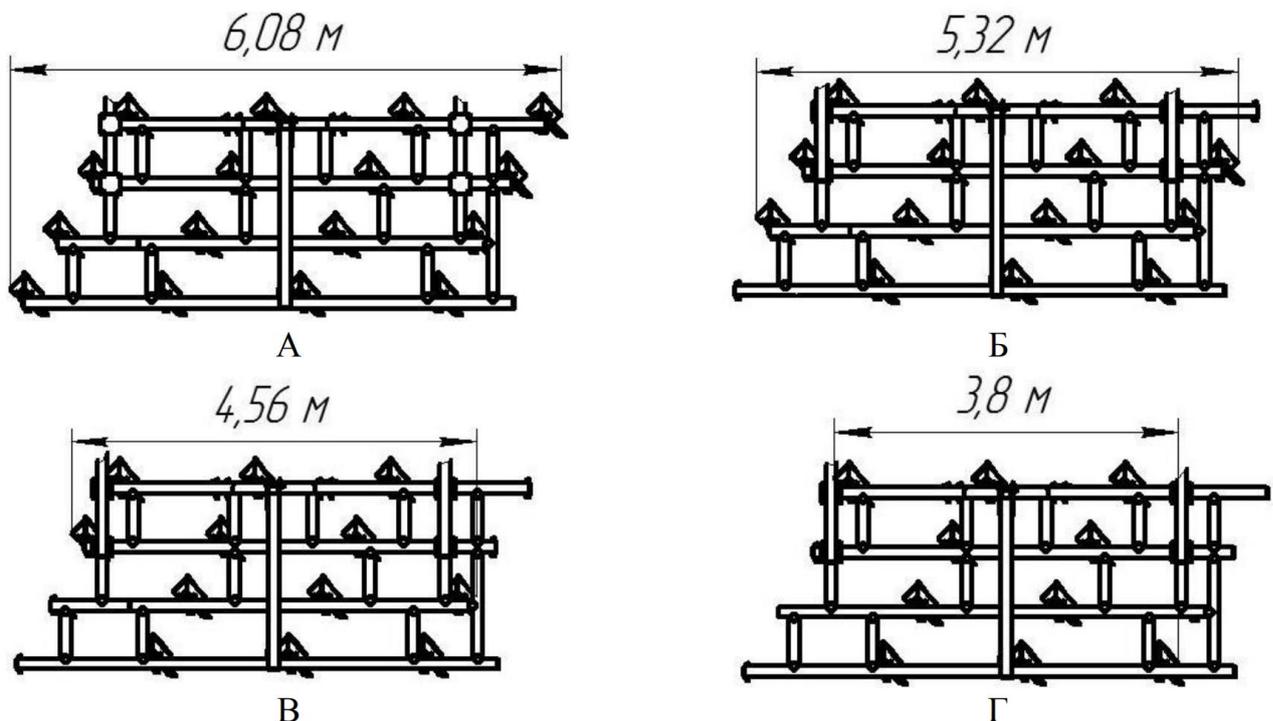


Рис. 2.1. Навісний секційний плуг із змінною шириною захвату А – 6,08 м; Б – 5,32 м; В – 4,56 м; Г – 3,80 м.

2.2. Методика експериментальних досліджень

Експериментальний плуг марки СМІК-16-38 зі змінним захватом (рис 3.1). Плуг агрегувався з трактором потужністю 200-250кВт.



Рис. 3.1. Експериментальний секційний лемешно-відвальний плуг СМІК-16-38 зі змінною шириною захвату.

Рама плуга являє собою каркас, виконаний з прямокутних труб перетином 120x120x8 мм. У фронтальній області рами розташоване триточкове навісне пристосування для з'єднання агрегату з трактором. Також рама оснащена чотирма рядами кріплень для змінних робочих органів. Для регулювання глибини обробки поля оранковий агрегат оснащений двома опорними колесами з механізмом для налаштування необхідної глибини обробки, розташованими на рамі по обидва боки від навісного пристрою.

Для виконання технологічного процесу плуг оснащений модернізованими робочими органами (рис. 2.2). На основній рамі плуга в чотири ряди встановлені відвальні корпуси.

Корпус складається зі стійки (1), до якої кріпиться відвал (2), в нижній частині встановлений башмак (3) з лемешами (4). Лемеші спарені і являють собою одне ціле. Ширина захвату корпусу становить 400 мм.

З тильного боку плуга на раму за допомогою хомутів встановлюються пристосування за варіантом № 1 або за варіантом № 2 для вирівнювання поверхні ріллі.

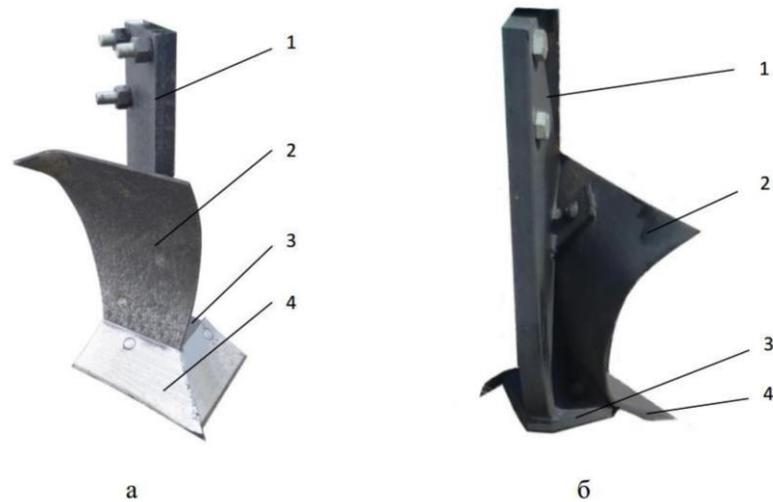


Рис. 2.2. Модернізований корпус плуга СМІК-16-38: а – вигляд спереду; б – вигляд ззаду 1 – стійка; 2 – відвал; 3 – башмак; 4 – стрілочаста лапа

Пристосування № 1 складається з двох вирівнювачів і трьох зіштовхувачів, які встановлюються на раму плуга (2.3-2.5).



Рис. 2.3. Плуг СМІК-16-38з пристосуваннями № 1 для вирівнювання поверхні ріллі: 1 – рама плуга СМІК -16-38; 2 – зіштовхувач; 3 – вирівнювач.



Рис. 2.4. Вирівнювач пристосування № 1.

Вирівнювач пристосування №1 має ширину захвату 3 м. Вирівнювач виготовляється з куточка розмірами 75 X 75 X 8 мм, сталі марки СТ 3 і пластини довжиною 3 м, товщиною 10 мм і шириною 120 мм. Вирівнювач за допомогою повідця і кронштейна встановлюється на раму плуга (рис. 2.3).



Рис. 2.5. Зіштовхувач.

Штовхачі виготовляються з пластин 500 x 250 x 10 мм, сталь 3 і за допомогою кронштейна і хомутів встановлюються на раму плуга.

Пристосування № 2 складається з чотирьох штовхачів (рис. 2.6), які встановлюються на раму плуга.



Рис. 2.6. Плуг СМІК-16-38 з пристосуваннями №2 для вирівнювання поверхні ріллі: 1 – рама плуга СМІК-16-38; 2 – відштовхувач.

Для проведення експериментальних досліджень виготовлялися 4 види штовхачів з різними кутами стріловидності γ і шириною захвату B_n (рис. 2.7).

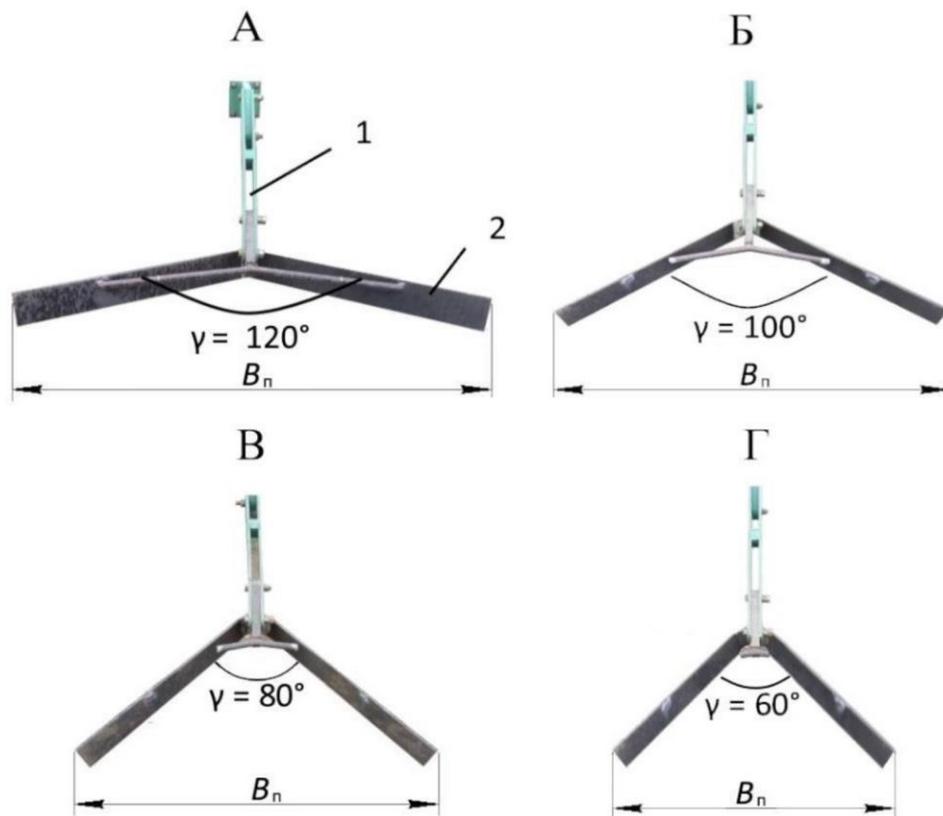


Рис. 2.7. Зіштовхувач пристосування №2: 1 – повідець; 2 – пластини; А – кут стріловидності γ – 120° , ширина захвату B_n – 1470 мм; Б – кут стріловидності γ – 100° , ширина захвату B_n – 1300 мм; В – кут стріловидності γ – 80° , ширина захвату B_n – 1040 мм; Г – кут стріловидності γ – 60° , ширина захвату B_n – 900 мм.

Пластини штовхача 845×120×10 мм виготовляються зі сталі марки Сталь 3 і за допомогою повідця через кронштейн встановлюються на раму плуга.

Розташування лемешів у вигляді стрілкової лапи забезпечує стиснення і розтягнення оброблюваного шару ґрунту, при цьому за рахунок криволінійної форми відвалу поліпшується руйнування ґрунту і знижується загальний опір. Далі розкришений обсяг землі піднімається лемішами і обертається відвалами в бік по ходу руху, при цьому за останнім корпусом секції будуть утворюватися гребені і відкриті борозни. Далі пристосування № 1 або № 2 за рахунок штовхача переміщує гребені ґрунту у відкриті борозни.

Висновки по розділу

На базі принципової схеми навісного секційного плуга розроблена конструктивно-технологічна схема навісного секційного плуга зі змінною шириною захвату, який включає в себе 16 корпусів з шириною захвату 0,38 м і пристосування для закладення відкритих борозен і вирівнювання поверхні ріллі, при цьому, за рахунок парного зняття корпусів, ширину захвату ступінчасто з 6,08 м можна зменшувати до 5,32 м; 4,56 м; 3,8 м.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Поля, де проводилися дослідження, були рівними. Ділянки однорідні.

Величина твердості ґрунту (до 4,8 МПа) і висота рослинних залишків (до 30 см) можна охарактеризувати як екстремальну, тобто були вищими за агротехнічні вимоги. Поля не були оброблені раніше.

На раму плуга кріпилися пристосування для зарівнювання за варіантом № 1 або № 2.

Перед початком досліджень проводилося регулювання плуга і пристосувань за варіантом № 1 і № 2 при установчій глибині обробки ґрунту плугом 0,2 м.

При випробуванні СМІК-16-38 з пристосуваннями, виконаними за варіантом №1, було встановлено, що скидач і вирівнювач практично не закладають борозни, які утворюються за корпусами четвертого ряду секцій плуга. Тому подальше дослідження плуга з пристосуванням №1 не проводилося.

Перевірка якості виконання основної обробки ґрунту плугом проводилася плугом з пристосуванням за варіантом № 2 при глибині обробки ґрунту 0,2 м.

У процесі досліджень визначали глибину борозен, що утворюються за задніми корпусами секційного навісного плуга, які закладалися пристосуваннями.

Встановлено, що пристосування №2 при куті постановки $\gamma = 80$ град. зіштовхувач більш ефективно закладає борозни, в порівнянні з №1 (рис. 3.1). Подальше зменшення кута γ (малюнок 3.8) не покращує закладення борозни, збільшує металоємність, масу і довжину секційного плуга.

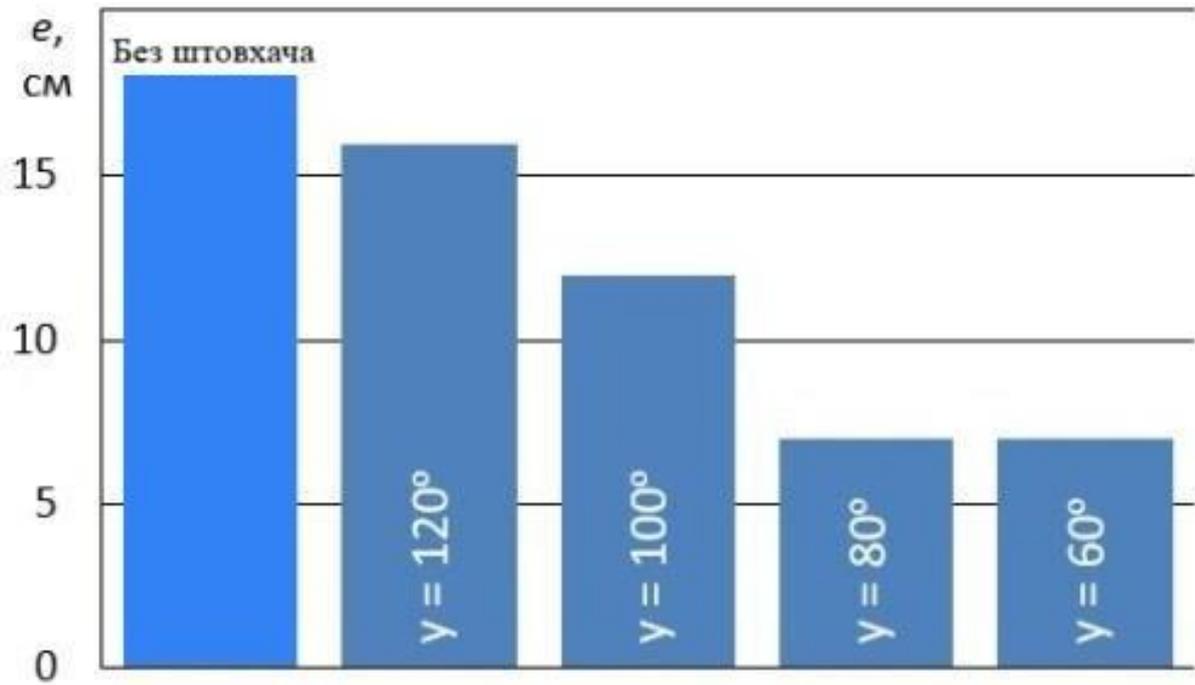


Рис. 3.1. Діаграма зміни глибини борозенки e від кута γ постановки зіштовхувача.

На рис. (3.2, 3.3, 3.4) представлені фотографії поверхні поля після роботи плуга з пристосуваннями за варіантом № 2 з кутами постановки штовхача: $\gamma = 120^\circ$; $\gamma = 100^\circ$; $\gamma = 80^\circ$.



Рис. 3.2. Поверхня поля після роботи плуга з вирівнювачем $\gamma = 120^\circ$.



Рис. 3.3. Поверхня поля після роботи плуга з вирівнювачем $\gamma = 100^\circ$.



Рис. 3.4. Поверхня поля після роботи плуга з вирівнювачем $\gamma = 80^\circ$.

Одночасно при дослідженні роботи пристосувань визначали кришіння ґрунту, гребнистість оброблюваного поля, рівномірність глибини обробки ґрунту, відхилення ширини захвату, ступінь закладення стерні та рослинних залишків, забивання та залипання корпусів.

Аналізуючи отримані результати досліджень, можна зробити висновок, що в основному, за винятком ступеня закладення стерні і глибини борозен, що утворюються за корпусами, які знаходяться в секціях четвертого ряду, плуг непогано справляється з роботою. Невідповідність АТВ показника ступеня

закладення стерні відбувається внаслідок невідповідності фізичної висоти стерні агротехнічним вимогам (34,2 см).

Дослідження периметра ґрунтового перерізу обробленого орного шару показали, що дно орного шару має практично плоску форму (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Профіль обробленого шару ґрунту.

При обробці злуценого поля (рис. 3.6) поверхня ґрунту рівна, а ступінь закладення стерні та рослинних залишків становить практично 100%.



Рис. 3.6 Поле оброблене агрегатом СМІК-16-38.

Експлуатаційні показники роботи орного агрегату для перевірки збіжності результатів теоретичних досліджень з експериментальними визначалися на полі, де проводилося визначення агротехнічних показників орного агрегату. Плуг СМІК-16-38 агрегувався з трактором John Deere 9630. Установча глибина обробки становила 0,2 м; 0,25 м; 0,3 м. Під час проведення досліджень визначалася глибина на ділянках, при установчій ширині 6,08 м, 5,32 м; 4,56 м;

3,8 м. Всі дослідження підтвердили повну відповідність глибини обробітку по всій ширині захвату плуга.

Можна зробити висновок, що при раціональному завантаженні трактора навісний секційний плуг зі змінною шириною може працювати на різній глибині обробки ґрунту за рахунок зміни ширини захвату плуга.

Як результат усіх досліджень – перевірка збігу теоретичних розрахунків з практичними дослідженнями (рис. 3.7) при ширині захвату 6,08 м, 5,32 м, 4,56 м, 3,8 м

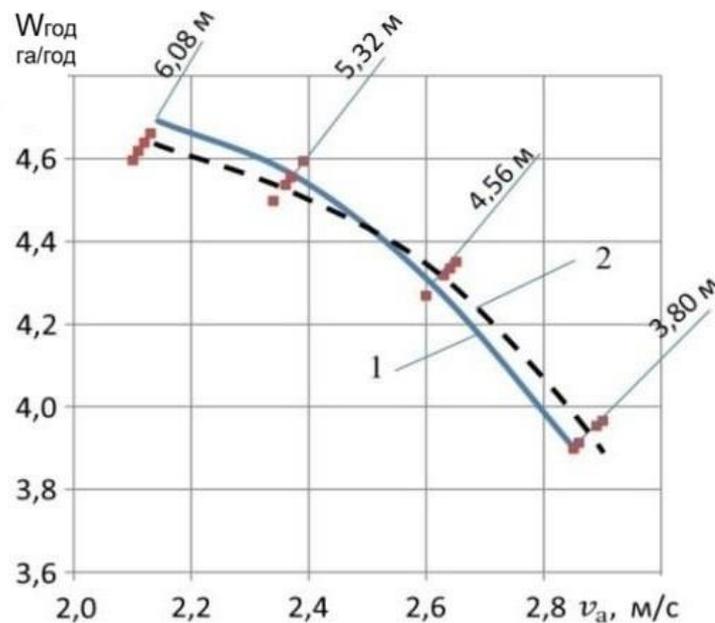


Рис. 3.7. Залежність продуктивності орного агрегату John Deere 9630+ СМІК-16-38 від швидкості руху v_a при установчій глибині 0,2 м і ширині захвату плуга 6,08; 5,32; 4,56 і 3,80 м; 1 – теоретична, 2 – експериментальна.

Аналіз закономірності зміни експериментальної та теоретичної залежностей (рис. 3.7) показав, що вони узгоджуються за критерієм χ^2 з довірчою ймовірністю 0,95.

Висновки по розділу

Дослідження підтвердили, що плуг з відповідним трактором досить якісно виконує технологічний процес оранки.

Виконання секційного плуга в навісному варіанті зі змінною шириною захвату дозволило забезпечити роботу трактора в різних режимах роботи.

Результати експериментальних досліджень з високою ймовірністю підтверджують результати теоретичного обґрунтування конструктивно-технологічної схеми навісного секційного плуга зі змінною шириною захвату.

Довірча ймовірність становить 0,95.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Аналіз орних агрегатів, що складаються з тракторів потужністю 200-250 кВт і багатокорпусних лемішно-відвальних плугів загального призначення показав, що зі збільшенням ширини захвату від 3,2 до 5,05 м довжина плуга збільшується в 3 рази, що знижує експлуатаційно-технологічні показники агрегатів. Це співвідношення можна змінити розміщенням корпусів на рамі плуга в кілька паралельних секцій.

На основі прийнятої принципової схеми та аналітичних виразів шириною захвату 0,38 м і розташованих ступінчасто на відстані 0,7 м на чотирьох паралельних секціях. Ширина захвату плуга 6,0 м. На плуг встановлюється розроблене пристосування для вирівнювання поверхні ріллі. Довжина плуга з пристосуванням 4,37 м. За рахунок зняття корпусів з рами плуг забезпечує ширину захвату 5,32 м; 4,56 м; 3,8 м.

Встановлено, що навісний секційний плуг із змінною шириною захвату від 3,8 до 6,08 м і різною швидкістю руху агрегату забезпечує раціональне завантаження трактора на глибині обробки ґрунту від 0,18 до 0,30 м. При цьому продуктивність орного агрегату за 1 годину основного часу змінюється від 5,3 до 2,38 га, а енергоємність – від 27,35 до 44,7 кВт·год/га.

Експериментальними дослідженнями технологічного процесу основного обробітку ґрунту, що виконується навісним секційним плугом зі змінною шириною захвату та пристосуваннями, встановлено, що плуг обробляє ґрунт з якістю, що відповідає основним агротехнічним вимогам, із закладенням борозен при куті постановки штовхача $\gamma = 80$ град. За рахунок зміни ширини захвату плуга, швидкості руху і глибини обробки ґрунту забезпечується робота трактора John Deere 9630 в раціональному режимі завантаження. Аналіз закономірності зміни експериментальної та теоретичної продуктивності орного агрегату при обробці ґрунту на глибину 0,20 м і ширині захвату плуга 6,08; 5,32; 4,56; 3,80 м підтвердив, що вона узгоджується з довірчою ймовірністю 0,95 за критерієм χ^2 .

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Медведєв В. В. Фізика ґрунтів України. Київ : Аграрна наука, 2015. 312 с.
2. Бойко П. І., Коваленко Н. П. Системи обробітку ґрунту в землеробстві України. Київ : Урожай, 2016. 268 с.
3. Шевченко С. М., Шевченко М. С. Основний обробіток ґрунту: теорія і практика. Дніпро : Ліра, 2018. 224 с.
4. Кравченко Ю. С., Гангур В. В. Вплив способів основного обробітку ґрунту на його агрофізичні властивості // Вісник аграрної науки. 2019. № 6. С. 12–18.
5. Гаврилюк А. В. Адаптація систем обробітку ґрунту до кліматичних змін в Україні // Агробіологія. 2020. № 1. С. 35–42.
6. Тараріко Ю. О., Ільєнко Т. В. Ґрунтозахисні технології землеробства. Київ : ННЦ «Інститут землеробства НААН», 2017. 192 с.
7. Шустик Є. О., Нілова Н. В. Смуговий обробіток ґрунту як чинник водозбереження // Новітні технології в АПК. 2018. № 23. С. 45–52.
8. Борак К. В. Комплексний підхід підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.05.11 / Поліський національний університет, м. Житомир. 2021. 380.
9. Борак К. В. Impact of soil moisture on wear intensity of the actuating elements of soil processing machines. Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології». 2020. № 2. С 34–41.
10. Борак К. В., Крук І. С. Вплив швидкості руху ґрунтообробних агрегатів на інтенсивність зношування робочих органів. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2020. №1. С. 30–36.
11. Борак К. В. Impact of soil moisture on wear intensity of the actuating elements of soil processing machines. Проблеми трибології. 2020. № 2. С 34–41.

12. Rogovskii, I. L., Borak, K. V., Maksimovich, E. Yu., Smelik, V. A., Voinash, S. A., Maksimovich, K. Yu., & Sokolova, V. A. (2020). Wear resistance of blade and disc working bodies of tillage tilling machines hardened by electrodes. T-series. *Journal of Physics : Conference Series*. 1679 (4), art. №. 042084.
13. Борак К. В., Куликівський В. Л. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів. Ч. 1: Теоретичні основи матеріалознавства : навч. посіб. Житомир : Поліський нац. ун-т, 2024. 101 с.
14. Медведєв В. В., Лактіонов М. І. Структурний стан орного шару ґрунтів України // Ґрунтознавство. 2016. Т. 17, № 3–4. С. 5–14.
15. Петриченко В. Ф. Наукові основи землеробства. Вінниця : ТОВ «Нілан-ЛТД», 2019. 360 с.
16. ДСТУ 4513:2006. Ґрунти. Методи визначення агрофізичних показників. Київ : Держспоживстандарт України, 2007.
17. Lal R. *Soil Tillage in Agroecosystems*. Boca Raton : CRC Press, 2019. 354 p.
18. FAO. *Conservation Agriculture*. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018. 78 p.
19. Hobbs P. R., Sayre K., Gupta R. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture // *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 2008. Vol. 363. P. 543–555.
20. Blanco-Canqui H., Lal R. *Principles of Soil Conservation and Management*. Dordrecht : Springer, 2010. 617 p.
21. Reicosky D. C., Archer D. W. Moldboard plow tillage depth and short-term carbon dioxide release // *Soil & Tillage Research*. 2007. Vol. 94. P. 109–121.
22. Derpsch R., Friedrich T. Development and current status of no-till adoption in the world // *Proceedings of the 18th Triennial Conference of the International Soil Tillage Research Organization*. Izmir, 2009. P. 25–38.

23. Tebrügge F., Düring R. Reducing tillage intensity – a review of results from a long-term study in Germany // *Soil & Tillage Research*. 1999. Vol. 53. P. 15–28.
24. Kassam A., Friedrich T., Shaxson F., Pretty J. The spread of conservation agriculture: justification, sustainability and uptake // *International Journal of Agricultural Sustainability*. 2009. Vol. 7(4). P. 292–320.
25. Six J., Elliott E. T., Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation // *Soil Biology and Biochemistry*. 2000. Vol. 32. P. 2099–2103.
26. Zhang S., Grip H., Lövdahl L. Effect of soil compaction on hydraulic properties of clay soil // *Soil & Tillage Research*. 2006. Vol. 87. P. 103–112.