

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно – технологічний факультет
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Допущений до захисту:

(Підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)

“ ”

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ І РЕЖИМІВ РУХУ ҐРУНТООБРОБНОЇ МАШИНИ

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
зі спеціальності 208 Агроінженерія

Виконав: студент групи АІ-20-3 Маг
Тарасенко Олександр Сергійович

Керівник: к.т.н., доцент

Труханська Олена Олександрівна

Вінниця - 2021р.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ, МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Аналіз існуючих технологічних операцій передпосівного обробітку ґрунту

1.2. Особливості обробітку дрібнонасінневих культур

1.3. Тенденції розвитку конструктивних особливостей робочих органів машин для передпосівного обробітку ґрунту

1.4. Аналіз теоретичних досліджень проектування і взаємодії робочих органів з ґрунтом

1.5. Висновки до розділу

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КОМБІНОВАНОЇ БОРОНИ

2.1. Модель взаємодії комбінованої борони з ґрунтом

2.2. Кінематика комбінованої борони

2.3. Обґрунтування форми робочої поверхні комбінованої борони

2.4. Технологічний процес передпосівного обробітку ґрунту

2.5. Обґрунтування параметрів комбінованої борони

2.6. Динаміка комбінованої борони

2.7. Висновки до розділу

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Методика проведення досліджень

3.2. Результати досліджень

3.3. Висновки до розділу

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ДОДАТКИ

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота на тему: “Обґрунтування параметрів комбінованої борони для передпосівного обробітку ґрунту” складається із вступу, 3 розділів розрахунково-пояснювальної записки, загальних висновків, списку використаних джерел із 60 назв і 9 аркушів графічної частини. Основний зміст роботи викладений на 75 сторінках машинописного тексту, містить рисунки і таблиці.

Магістерська робота присвячена удосконаленню технологічного процесу обробітку ґрунту із врахуванням ресурсозберігання.

У першому розділі наведено аналіз технологічних процесів і знарядь для передпосівного обробітку ґрунту, під дрібнонасінневі культури, виявлені їх переваги і недоліки за якістю обробітку, поставлено мету та задачі досліджень.

У другому розділі обґрунтовано вибір форми і основні параметри і режими роботи робочого органу на основі теоретичного дослідження технологічного процесу взаємодії комбінованої борони з ґрунтом.

У третьому розділі наведено методику проведення досліджень та їх результати.

Використання комбінованої ґрунтообробної борони дозволить виконати технологічний процес передпосівного обробітку ґрунту в оптимальні терміни, зменшити енергоємність і знизити експлуатаційні витрати.

Отримані результати можуть бути використані для подальшого удосконалення знарядь для обробітку ґрунту.

Ключові слова: ґрунт, знаряддя, борона, обробіток, ресурсозберігання.

SUMMARY

Master's work on the topic "Justification of the parameters of the combined harrow for pre-planting tillage" consists of the introduction, 3 sections of the settlement and explanatory note, the general conclusions, the list of used sources with 60 titles and 9 sheets of the graphic part. The main content of the work is set out on 75 pages of typewritten text, contains drawings and tables.

The master's work is devoted to the improvement of the technological process of soil cultivation, taking into account resource conservation.

The first section provides an analysis of technological processes and implements for pre-sowing cultivation of soil, for petty crops, their advantages and disadvantages in the quality of cultivation, the purpose and objectives of research are set.

In the second section the choice of forms and the basic parameters and operating modes of work of the working body is substantiated on the basis of the theoretical study of the technological process of the interaction of the combined harrow with the soil.

The third section provides a methodology for conducting research and its results.

The use of combined tillage harrow will allow the technological process of pre-sowing tillage of soil to be optimized, reduce energy consumption and reduce operating costs.

The obtained results can be used for further improvement of tools for soil cultivation.

Key words: soil, tools, harrow, cultivation, resource saving.

ВСТУП

Забезпечення виробництва продукції рослинництва пов'язане з якісним обробітком ґрунту. При цьому в залежності від його механічних та фізико-механічних властивостей можуть застосовуватись різні технології його обробітку, але всі вони так чи інакше пов'язані із взаємодією робочих органів з ґрунтом. При цьому на процеси, пов'язані із взаємодією робочих органів з ґрунтом, суттєвий вплив мають як параметри та режими роботи самих робочих органів, так і механічні властивості ґрунту [1]. Оскільки встановлено, що на енергомісткість цих процесів суттєвий вплив має швидкість переміщення робочих органів (це пов'язане з впливом динамічної в'язкості ґрунту), то постає питання про оптимальну швидкість руху самого агрегату. На енергомісткість виконання операції буде суттєво впливати кут нахилу поля в напрямку руху агрегата, тому визначення раціональних параметрів та режимів руху ґрунтообробної машини, в залежності від механічних властивостей ґрунту та макрорельєфу поля є актуальною темою досліджень, яка спрямована на енергозбереження [2, 3].

В останні роки сільське господарство нарощує виробництво сільськогосподарської продукції. Пріоритетним напрямком є виробництво сировини для розвитку біоенергетики та інших нетрадиційних джерел енергії, серед яких такі дрібнонасіненні культури, як льон – довгунець, ріпак, та які мають тенденцію подальшого збільшення посівних площ [4].

Для вирішення задач взаємодії робочих органів з ґрунтом необхідно, крім його формалізації, встановити адекватність представлення рішень у вигляді одномірних, плоских розв'язків та поєднання двох плоских взаємно перпендикулярних рішень. Дослідження, в яких вирішувались одномірні задачі взаємодії робочих органів з ґрунтом [5], не враховують геометричні розміри та форму робочих органів. Розподілений по поверхні робочого органу тиск зводиться до рівнодіючої, прикладеної в деякій точці поверхні. Така постановка задачі дозволяє враховувати лише проекцію площі робочого органу на площину, перпендикулярну до напрямку його переміщення, і не дозволяє

враховувати навіть відмінність в опорі переміщенню робочих органів з різним співвідношенням глибини обробітку та ширини захвату [6].

У стратегії розвитку аграрного сектору та відновлюваної енергетики в Україні основна мета полягає у визначенні пріоритетів політики сталого розвитку біоенергетики в частині, що стосується аграрного сектору, розкритті повного потенціалу біоенергетики для підвищення рівня сталості та зниження виробничих витрат у сільському господарстві, а також зменшення забруднення навколишнього середовища [4-6].

Однією з найбільш значущих і технологічно складних для виконання операцій є передпосівний обробіток ґрунту під сівбу дрібнонасінневих культур. Так, при обробленні дрібнонасінневих культур за нормальною технологією із застосуванням одноопераційних спеціалізованих машин, тракторами і сільськогосподарськими машинами ущільнюється понад 55% площі поля, ділянки піддаються багатократному впливу, що знижує урожайність до 8...10%. Крім того, швидкісні енергонасичені трактори не вдається повністю завантажувати звичайними одноопераційними машинами, застосовуваними в рослинництві [3, 4, 8].

Із вище зазначеного випливає, що необхідно не тільки покращувати способи, технології та системи обробки ґрунту, а й використовувати більш сучасні комбіновані машини і агрегати, експлуатація яких скорочує число проходів по полю, втрати на холості проходи і переїзди; знижує грошові, трудові, питомі ресурси - і енергетичні витрати; дозволяє збільшити продуктивність праці [9].

Застосування таких агрегатів дозволяє за один прохід підготувати ґрунт під посів, скоротити число проходів по полю, зменшити ущільнення ґрунту, підвищити продуктивність праці, прискорити терміни посіву дрібнонасінних культур, що особливо важливо для високих технологій вирощування сільськогосподарських культур.

Дослідження, в яких вирішувались одномірні задачі взаємодії робочих органів з ґрунтом [10], не враховують геометричні розміри та форму робочих органів. Розподілений по поверхні робочого органу тиск зводиться до рівнодіючої, прикладеної в деякій точці поверхні. Така постановка задачі дозволяє враховувати лише проекцію площі робочого органу на площину, перпендикулярну до напрямку його переміщення, і не дозволяє враховувати навіть відмінність в опорі переміщенню робочих органів з різним співвідношенням глибини обробітку та ширини захвату. Такі рішення ґрунтуються на відомій раціональній формулі В. П. Горячкіна, яка являє собою розвиток феноменологічної залежності Ейлера, що характеризує опір переміщенню тіла в середовищі [11, 12].

Друга складова зниження енергомісткості процесів обробітку ґрунту і взагалі процесів, пов'язаних з роботою мобільних машинно-тракторних агрегатів, пов'язана з оптимізацією їх швидкісних режимів руху, що залежать від тягових потужностей мобільних енергозасобів та опорів, які спричинені машинами, що виконують технологічні операції. Слід відзначити, що такі роботи проводяться в напрямку оптимального завантаження енергозасобів шляхом раціонального комплектування машинно-тракторних агрегатів. Такий підхід не можна вважати досконалим, оскільки у зв'язку зі значним впливом на енергетичні показники оточуючого середовища (матеріалів та середовищ, що обробляються, та макронерівностей профілю полів) виникають суттєві відхилення у розрахункових параметрах МТА [5, 9, 13].

РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ, МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Аналіз існуючих технологічних операцій передпосівного обробітку ґрунту

Механічна дія робочих органів ґрунтообробних машин (обробіток ґрунту) спрямована на зміну фізико-механічних властивостей ґрунту з метою підвищення його потенціальної енергії, яка використовується рослинами. Механічний обробіток ґрунту здійснюється в результаті направленої дії робочих органів ґрунтообробних машин на ґрунт і може бути представлений схемою, наведеною на рис. 1.1 [14].

Рис. 1.1 Схема механічного обробітку ґрунту

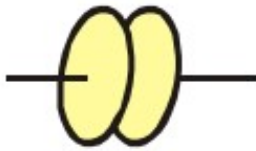


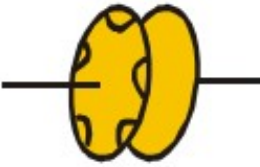


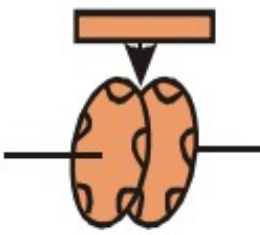




Зміна об'ємної маси ґрунту відбувається в результаті реакцій ґрунту на послідовні дії на нього робочого органу ґрунтообробної машини. Ці дії проявляються в створенні напружено-деформованого стану ґрунту, в результаті чого виникають пружні зворотні деформації (пружна складова), а після перевищення граничного значення критерію міцності (межі пластичності) відбуваються незворотні деформації. Формалізована схема механічного обробітку ґрунту наведена на рис. 1.2.

Рис.1.2 Схема формалізації механічного обробітку ґрунту [15]

Зміни технологічних властивостей ґрунту при його механічному обробітку відбуваються під дією робочих органів пасивної, або активної дії. Класифікація робочих органів пасивної дії [52], наведена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Основні типи пасивних робочих органів ґрунтообробних машин

Вид та глибина (см) обробітку ґрунту	Типи ґрунтообробних машин для основного обробітку ґрунту		
	Плуги полицеві	Дискові знаряддя	Чизельні знаряддя
Поверхневий (0-8)	-	Дискові лушчильники 	Легкі культиватори 
Мілкий (8-16)	Плуги-лушчильники 	Дискові борони 	Важкі культиватори 
Середній (16-24)	Обертові плуги загального призначення 	Важкі дискові борони 	Плоскорізи, чизель-культиватори 
Глибокий (24-32)	Плуги ярусні 	Дискові плуги 	Чизельні плуги, глибоко-розпушувачі 

Поверхневий (0-8)		Дискові лушчильники	Легкі культиватори
Мілкий (8-16)	Плуги-лушчильники	Дискові борони	Важкі культиватори

Середній (16-24)	Обертові плуги загального призначення	Важкі дискові борони	Плоскорізи, чизель-культиватори
Глибокий (24-32)	Плуги ярусні	Дискові плуги	Чизельні плуги, глибоко-розпушувачі

1.2 Особливості обробітку ґрунту

Ґрунтом називають поверхневий диспергований (здрібнений) шар земної кори, найважливішою властивістю якого є родючість. Під родючістю розуміють здатність ґрунту задовольняти впродовж усього вегетаційного періоду потреби культурних рослин у поживних речовинах, воді, повітрі і теплі.

Ґрунт є багатофазним середовищем з певним запасом теплової, хімічної енергії та енергії живих організмів, що живуть у ньому. До складу ґрунту входять три основні фази: тверда, рідка і газоподібна.

Тверда фаза має складну будову: окрім мінеральної вона містить органічну частину (гумус), а також мікрофлору і мікрофауну.

Рідка фаза складається, в основному, з водного розчину мінеральних і органічних солей та кислот, а газоподібна — з повітря, у якому містяться різні гази і пари води.

Ґрунт, як уже зазначалося, являє собою пористе тіло. Під пористістю ґрунту розуміють відношення об'єму всіх пор, заповнених водою та повітрям, до загального об'єму ґрунту. Розрізняють некапілярні і капілярні пори. Некапілярні пори - це проміжки між ґрунтовими агрегатами й окремими

структурними грудочками. Маючи порівняно великі розміри, некапілярні пори не затримують дощову воду, і вона під дією сили тяжіння вільно стікає у нижні шари ґрунту, а проміжки заповнюються повітрям. Капілярні пори пронизують переважно структурні агрегати і грудочки, мають дуже малі розміри, добре затримують дощову воду. По капілярах ґрунтові води піднімаються до поверхні.

Ґрунтове повітря, що заповнює великі пори, вільно сполучається з атмосферним повітрям і реагує на зміну його температури, тиску та вологості.

Основним джерелом води для живлення і життєдіяльності рослин є ґрунтова волога. У ґрунті розрізняють чотири основних категорії води: зв'язану, капілярну, вільну (гравітаційну) і пароподібну. Зв'язана вода (не вільна) тонким шаром розташовується навколо ґрунтових часток і міцно утримується адсорбційними силами. Капілярна вода утримується в найбільш тонких порах між ґрунтовими агрегатами та у внутрішньо-агрегатних капілярах і під дією меніскових сил може переміщатися в ґрунті в напрямку розташування капілярних пор. Пароподібна вода знаходиться в ґрунтовому повітрі у формі водяної пари. Вона завжди перебуває в стані руху і може пасивно переміщуватися разом з потоками повітря.

Тверді мінеральні елементи ґрунту являють собою частинки різних розмірів, класифікація яких наведена в таблиці 1.2 [21].

Таблиця 1.2 Структурний склад ґрунту

Процентний вміст твердих мінеральних елементів ґрунтових фракцій характеризує тип та фізико-механічні властивості ґрунту.

Так, ґрунти з високим відсотком вмісту мулистих частинок відносяться до важких. Ґрунти з великим вмістом піску характеризують як легкі. Найбільш цінними за механічним складом вважають суглинкові та супіщані ґрунти із вмістом мулистих частинок від 10 до 40 %.

Згідно з класифікацією [21], в залежності від співвідношення частинок „фізичної глини” та „фізичного піску” ґрунти умовно ділять на такі основні типи (табл.1.3).

Таблиця 1.3. Класифікація ґрунтів за гранулометричним складом

Розрізняють ґрунти структурні і безструктурні. Структурні ґрунти можуть розпадатися на окремі, різні за величиною і формою агрегати, грудочки, зерна і утворювати ґрунтовий об'єм з різними типами упаковки агрегатів, що суттєво впливає на їх агрономічну цінність. Безструктурний ґрунт зазвичай представляє собою або щільну масу з дрібних пилоподібних частинок (діаметром менше 0,25 мм), або складається з переущільнених (з низькою пористістю) великих агрегатів діаметром від 1 до 10 см і більше.

Властивість окремих частинок ґрунту створювати стійкі механічні системи називають зв'язністю. Зв'язність залежить від механічного складу ґрунту, вмісту в ньому вологи, повітря, золів, гелів і т.д. Фізична природа походження фізико-механічних зв'язків не належить до об'єкту та предмету досліджень, пов'язаних з дослідженнями напружено-деформованого стану ґрунту при зміні його фізико-механічних властивостей механічною дією робочих органів ґрунтообробних машин. В зв'язку з цим, слід розглядати лише ті властивості ґрунту, які можуть бути змінені в процесі механічного його обробітку.

1.3. Тенденції розвитку конструктивних особливостей робочих органів машин

Для аналізу взаємодії робочих органів з ґрунтом останній повинен бути формалізований у вигляді моделі того чи іншого середовища таким чином, щоб властивості цієї моделі найбільш повно відповідали властивостям реального ґрунту.

Проблемі взаємодії ґрунтообробних робочих органів з ґрунтом присвячена значна кількість робіт. Великої уваги заслуговує класифікація моделей взаємодії, наведена у [19, 20]. В основу цієї класифікації покладено форму представлення моделі будови ґрунту і види деформацій, які виникають у процесі взаємодії. Такий підхід дозволяє згрупувати зроблені багатьма дослідниками спроби розробити ті чи інші моделі взаємодії різних робочих органів за певними ознаками. Це полегшує аналіз виконаних досліджень і дозволяє зробити необхідні висновки. Всі дослідження, які стосуються взаємодії робочих органів з ґрунтом, по формі представлення моделі побудови ґрунту можна розділити на чотири групи: тверде тіло; суцільне пружне середовище; суцільне нестискуване сипке середовище; суцільне пружно-в'язко-пластичне середовище.

При цьому, в якості аналітичного апарату використовуються: методи механіки твердого тіла, методи теорії пружності та її спрощені варіанти, методи механіки ґрунтів, методи теорії подібності та розмірностей, методи статистичної механіки.

Результатом процесу обробітку ґрунту є зміна його фізико-механічних властивостей. За рахунок механічної дії робочих органів ґрунтообробних машин на ґрунт можуть бути змінені функціонально зв'язані між собою щільність, пористість та питомий об'єм твердої фази. В залежності від мети обробітку ґрунту ці величини необхідно змінювати в сторону збільшення або зменшення [14, 18, 20].

Механічний обробіток ґрунту здійснюється за рахунок взаємодії робочого органу ґрунтообробної машини з ґрунтовим середовищем. Для формалізації цієї взаємодії слід виділити два послідовних процеси. Перший – це створення напружено-деформованого стану і другий – забезпечення переміщення ґрунту в просторі та часі. Як в першому, так і в другому процесі відбуваються зміни фізико-механічних властивостей ґрунту.

В першому процесі під дією деформатора у ґрунті виникають напруження. Напруження середовища викликають в ньому деформації об'ємні (деформації першого роду) та формозміни, або зсувні (деформації другого роду). При цьому, перший процес (створення напружено-деформованого стану) слід розділити на дві фази – фазу малих деформацій до порушення суцільності і фазу руйнування суцільності і пластичної течії (руйнування зв'язків між ґрунтовими частинками).

Напруження, які створює робочий орган, функціонально зв'язані з деформаціями. Цей функціональний зв'язок має вигляд, який залежить від пружності, в'язкості та граничного напруження руйнування міцності. Умовно вплив співвідношень компонентів напружень (деформацій) на зміну властивостей можна виразити графічно через функцію (рис. 1.4), яка залежить від гідростатичних та максимальних дотичних напружень. Ці напруження виражаються через головні таким чином [1, 15, 23]:

(1.1)

Деформації, які відбуваються у ґрунті, можуть бути зворотними в межах дії закону пружності Гука та залишковими при виконанні умови Сен-Венана [1].

Під дією гідростатичної складової напружень відбуваються об'ємні деформації (зворотні або залишкові), при яких змінюються щільність, пористість та в залежності від знаку щільність та пов'язані з нею величини збільшуються.

Крім того, зміна щільності ґрунту може відбуватися під дією зсувних деформацій (дилатація) [22, 33].

Різноманітність ґрунтово-кліматичних умов, зональність сільського господарства та необхідність постійного підвищення родючості сільськогосподарських угідь, оптимізації водно-повітряного режиму, запобігання водної та вітрової ерозії земель, що використовуються, обумовили наявність широкого спектру ґрунтообробних знарядь різних типів та конструкцій. Одне з провідних місць в цьому спектрі займають ґрунтообробні знаряддя з дисковими робочими органами [26]. Основними типами знарядь з дисковими робочими органами є дискові плуги, дискові луцильники та дискові борони.

Дискові плуги, в свою чергу, поділяються на прямі, сферичні та з вирізними вікнами. Вони застосовуються для обробітку твердих сухих ґрунтів на глибину 25-30 см, а також ґрунтів, які містять потужні корені дерев. На звичайних ґрунтах дискові плуги показують гіршу якість оранки, ніж лемішні через те, що не забезпечують повного заробляння рослинних залишків. Крім того, ґрунт після обробітку дисковим плугом стає більш брилистим (в порівнянні з обробітком лемішним плугом) і потребує додаткових обробок для підготовки до сівби. Характерною особливістю дискових плугів є індивідуальна система кріплення дисків, причому диски мають діаметр $D_{\alpha\beta}$ [13].

Дискові луцильники, відповідно до відомої класифікації [170], поділяються на сферичні, прямі, голчасті та з вирізними вікнами.

Дискові борони за призначенням поділяються на польові, садові та болотні; за типом робочого органу - на сферичні, голчасті, плоскі та з вирізними вікнами.

Дискові луцильники і борони відрізняються тим, що диски складаються в батареї на загальних, звичайно горизонтальних осях (β кут α установки дисків до лінії руху у борін не перевищує $12-25^\circ$, а у луцильників досягає до 35°).

Розрізняють такі типи дискових робочих органів: плоскі диски, сферичні диски, вирізні диски, лункоутворювачі, крильчатки, голчасті диски та дискові копачі. Конструкційні схеми цих робочих органів наведені на (рис. 1.7).

Плоскі диски використовують в якості дискових ножів на плугах, в луцильниках, призначених для обробітку ґрунтів, схильних до вітрової ерозії, та в сівалках.

Сферичні диски застосовують як робочі органи дискових плугів, луцильників, борін, іноді сівалок.

Вирізні диски встановлюють на важких боронах, які використовують як для первинного обробітку важких дернових ґрунтів, так і для розробки зв'язаних скиб, піднятих при оранці болотних та кущово-болотних земель.

Лункоутворювачі застосовують для обробітку ґрунтів, схильних до водної ерозії. Вони містять модулі, складені з пари дисків, установлених на валу ексцентрично, причому так, що один обернений відносно іншого на кут 180° . Занурюючись в ґрунт, диски утворюють лунки овальної форми, які мають затримувати талі води, ємкістю 20...25 дм³ та загальною кількістю 12...14 тис. шт./га.

Рис. 1.7 Дискові робочі органи:

а) плоский диск; б) сферичний диск; в) вирізний диск; г) лункоутворювач; д) крильчатка; е) голчастий диск; є) дисковий копач

Крильчатка використовується разом із плугом (трилопатева), чи культиватором (чотирилопатева) для обробітку ґрунтів, схильних до водної ерозії. Призначення її таке саме, як і лункоутворювача.

Голчастий диск - робочий орган ротаційної мотики, голчастої борони, культиватора.

Відповідно до знаряддя, використовується для передпосівного обробітку ґрунту, руйнування ґрунтової кірки на посівах, для розпушування поверхні ґрунту та заробки насіння бур'янів зі збереженням стерні на ґрунтах, схильних до вітрової ерозії, для знищення бур'янів в захисних зонах просапних культур.

Дисковий копач використовується на бурякозбиральних комбайнах, які відокремлюють гичку на корені.

Крім того, існує класифікація дискових робочих органів, що пропонує Синєоков Г.Н. [17] (рис. 1.8).

Рис. 1.8 Класифікація дискових робочих органів ґрунтообробних машин [17]

Характерними ознаками дискових ґрунтообробних знарядь є напрям обертання робочих органів та положення їх осі обертання в просторі. Тому існує класифікація за цими параметрами (рис. 1.9) [16, 17, 18].

Дискові ґрунтообробні знаряддя можна поділити на дві великі групи: знаряддя з активними робочими органами та знаряддя з пасивними робочими органами. Оскільки обертання пасивних робочих органів відбувається за рахунок взаємодії (зчеплення) робочих органів з ґрунтом, а не за рахунок додаткового джерела енергії, то вартість процесу ротаційного обробітку зменшується, відпадає необхідність в передаточних механізмах, підвищується технологічність їх виготовлення [17, 18].

Рис. 1.9 Класифікація дисків ґрунтообробних машин та знарядь по розташуванню осі обертання [17]

А – горизонтально-поперечне; Б – вертикальне; В – поздовжнє; Г – повернуте; Д – поперечно-нахилене; Е – поздовжньо-нахилене; Ж – повернуте і нахилене.

Основні типи дисків та їх конструкційні параметри передбачені [39]. Відповідно до цього стандарту встановлюються такі типи дисків ґрунтообробних посівних та висаджувальних машин:

тип «А» - плоскі диски з центральним отвором та декількома кріпильними отворами;

тип «В» - сферичні диски;

тип «С» - сферичні диски з плоским днищем;

тип «Д» - сферичні диски з ексцентричним плоским диском та квадратним отвором; тип «Е» - плоско-сферичні диски.

Для ротаційних луцильників та борін використовуються головним чином диски типу «В». Вони виготовляються в чотирьох варіантах: диски з квадратним центральним отвором; диски з круглим центральним отвором; диски з центральним та декількома кріпильними отворами; диски з центральним квадратним та декількома кріпильними отворами. Кожен з цих варіантів має декілька виконань. Серед них найбільш поширені диски з гладкою кромкою та диски з вирізами по периферії.

При обробці стандартними ротаційними робочими органами (рис.1.7) ґрунт внаслідок інтенсивної дії на нього не тільки розпушується, але і розлущується, причому інтенсивність дії на ґрунт, а відповідно, і ступінь розлущування збільшується зі збільшенням довжини леза робочого органу, яке знаходиться в контакті з ґрунтом. Ця пояснюється той факт, що диски з вирізами по периферії (рис. 1.7 д, е) порівняно з дисками з гладкою кромкою (рис. 1.5 а, б, в, г, е), інтенсивніше розлущують ґрунт, руйнуючи брили ударною дією хордоїдальної частини леза [208]. Підвищене розлущування ґрунту під дією стандартних дискових робочих органів підтверджується проведеними дослідженнями [13-18]. Саме через це обробіток ґрунту дисковими луцильниками вважається недоцільним і навіть небезпечним в степових районах, де нерідко бувають інтенсивні пилові бурі.

В процесі роботи кожен диск вирізає в ґрунті пласт, утворюючи жолобчасте дно борозни.

Вирізаний пласт падає на ґрунт частково між дисками, частково на сусідній диск, а потім уже на ґрунт. При цьому відбувається кришення, розпушування, часткове обертання та перемішування ґрунту, подрібнення бур'янів. Між жолобами залишаються гребені.

Висота цих гребенів залежить від діаметра диску, відстані між дисками та кута атаки дискової борони. За висотою цих гребенів оцінюють якість обробітку ґрунту: чим нижчий гребінь, тим вище якість.

Іншими важливими показниками якості обробітку є підрізання поживних залишків та бур'янів, ступінь розпушування, глибина обробітку, відсутність огріхів, прямолінійність проходу агрегатів.

Еліпсоїдні диски як гладкі, так і вирізні, які відрізняються більшою ефективністю в роботі порівнянні зі звичайними сферичними, пропонують Генрі Френсіс та Майкл Аллот [25]. У діаметральному перерізі такий диск є частиною кривої еліпса з оптимальними розмірами: велика вісь 1023 мм, мала 705 мм, а ділянка необхідної кривої еліпса обмежена хордою 810 мм, яка розташована паралельно більшій осі вихідного еліпса. Еліпсоїдна форма диску в процесі роботи призводить до підвищених динамічних навантажень і відповідно, до підвищеної інтенсивності дії на ґрунт. Це, у свою чергу, зумовлює інтенсивне підрізання бур'янів та подрібнення рослинних решток. З іншого боку, збільшений, порівняно зі стандартними, діаметральний розмір диска призводить до зростання вертикальної складової реакції ґрунту, що погіршує заглиблення диска у ґрунт, а динамічні явища, які виникають при обробітку, мають наслідком нерівномірність глибини обробітку, а також руйнування агроструктури ґрунту, її розпилення.

Відомо, що ґрунтообробне знаряддя довільної геометричної форми, в тому числі і диск, можна представити як тригранний клин, який певним чином зорієнтований у просторі за напрямком руху. Кут, який утворює вектор напрямку руху агрегату з площею обертання диску, є кутом його атаки [22].

Також відомо, що якість розпушення ґрунтообробними знаряддями практично повністю визначається величиною цього кута [24]. Експериментально було встановлено, що оптимально якісне розпушення відбувається при значенні кута атаки $30...50^\circ$, а при значенні кута $18...28^\circ$ диск не забезпечує якісного розпушення і не виконує агротехнічних вимог щодо висоти нерозпушених гребенів на дні борозни.

Також встановлено, що в конструкції, що передбачає можливість зміни кута атаки дисків, сталість технологічного процесу залежить від конструктивних параметрів несучих елементів конструкції. Питання в тому, що в процесі роботи розпушений ґрунт, рухаючись разом з диском, набуває імпульсу руху під кутом до поверхні. Величина і напрямок імпульсу напруги залежать від кута атаки. Тому деякий час шар ґрунту знаходиться у завислому стані, а диски другого ряду спроможні забезпечити технологічну надійність тільки при сталому положенні поверхні. Те саме стосується і опорного котка.

Підвищення якості розпушення ґрунту та технологічної надійності ґрунтообробного агрегату досягається шляхом зміни кутів постановки дисків відносно напрямку руху агрегату та оптимізацією конструктивних параметрів

несучих елементів конструкції. Для цього в ґрунтообробному агрегаті (рис. 1.10) на базовій рамі встановлені під кутом до вертикалі два ряди сферичних дисків з можливістю регулювання кута атаки в межах 30...45 градусів, при цьому кути атаки дисків одного ряду орієнтовані по один бік, а другого ряду - по другий бік відносно напрямку руху.

Рис. 1.10 Схема ґрунтообробного агрегату та принципова схема орієнтації диска відносно напрямку переміщення

Встановлення кута атаки диска в межах 30о...45о забезпечує оптимальний режим розпушення ґрунту в широкому діапазоні ґрунтово-кліматичних умов.

1.4. Аналіз теоретичних досліджень взаємодії робочих органів з ґрунтом

Аналіз наукових досліджень і досвід практичного застосування ротаційних робочих органів дозволяє узагальнити їх основні агротехнологічні, технічні та конструкційні показники, що відповідають ОСТ 23.2.147-85, у порівнянні з найбільш широко використовуваними робочими органами (табл. 1.4).

Таблиця 1.4

Порівняльна оцінка ротаційних робочих органів (показники ротаційних робочих органів за ОСТ23.2.147-85 обрані за 1,0)

Основні показники	Суцільний диск (відпов. ОСТ 23.2.147-85)	Кільцевий (пасивного типу)	Голчастий (пасивного типу)	Кільцевий (активного типу)	Голчастий (активного типу)
Якість обробітку за інтенсивністю руйнування структури ґрунту	1,0	1,5	1,3	1,3	1,5
Агротехнологічна якість виконання технологічного процесу	1,0	1,0	0,8	1,1	0,8
Рівень енергозбереження робочого процесу	1,0	1,5	1,3	0,6	0,8

Основними геометричними параметрами дисків є діаметр та радіус кривизни [33], оскільки плоский диск можна розглядати як сферичний з радіусом кривизни, що дорівнює нескінченості. З цими параметрами

пов'язаний кут, що дорівнює половині центрального кута дуги центрального перерізу диска (рис. 1.11). Кожен із зазначених параметрів несе певне технологічне навантаження. Зі збільшенням діаметра диска різко зростає вертикальна складова реакції ґрунту, внаслідок чого погіршується заглиблюваність його в ґрунт. Отже, діаметр диска має бути мінімально можливим за характером та умовами роботи. Діаметр диска залежить від технологічно заданої максимальної глибини обробітку ґрунту і має бути, в крайньому випадку, більшим за її подвоєне значення:

(1.4)

де k – коефіцієнт, що дорівнює для плугів 3...3,5; для борін - 4...6 і для луцильників - 5...6.

Рис. 1.11 Основні геометричні параметри диска: – діаметр диска; – радіус кривизни сфери; – кут загострення; передній кут; – задній кут; – кут різання

Радіус кривизни визначає подрібнюючу та обертаючу спроможності диска. Чим менший радіус кривизни, тим інтенсивніше подрібнюється та обертається пласт. Як видно з рис. 1.11, між r та α існує наступна залежність:

(1.5)

Розрахунки показують, що із зменшенням діаметра диска збільшується висота непідрізаного гребеня дна борозни після проходу при постійній глибині.

Окремі геометричні елементи дисків і параметри їх установки зв'язані між собою функціональними залежностями. Так, кут атаки дисків визначає бокове зміщення, обертання і кришення підрізаного пласти.

Рис. 1.12 Залежність технологічних показників роботи дисків від конструктивних параметрів:

- а) зміна висоти гребеня дна C від діаметру диска при різних кутах атаки;
- б) зміна відношення висоти гребеня дна C до глибини обробки a в залежності від кута атаки для дисків різного діаметру;
- в) залежність ступеня підрізання рослинних залишків N від кута атаки γ для дисків різного діаметру.

Збільшення кута атаки призводить до зменшення висоти гребенів дна борозни і покращує підрізання рослинних залишків і перемішування поверхневого шару (рис. 1.12). Проте надмірне збільшення кута може призвести до забивання дисків ґрунтом з пожнивними залишками, і тому граничний кут на луцильниках не повинен перевищувати 35° .

Наведені на графіку криві залежності висоти гребеня від діаметра дисків для кожного кута атаки показують, що діаметр не завдає значного впливу на висоту гребеня.

Суттєвий вплив на цей показник якості обробки ґрунту має кут атаки дисків, збільшення якого з 35° до 40° знижує висоту гребеня до 22 мм для дисків діаметром 450 мм і до 26 мм для дисків діаметром 400 мм.

Фізична сутність виявленої закономірності полягає в тому, що зі зменшенням висоти гребенів дна при збільшенні кута атаки зростає кількість підрізаних рослинних залишків [33].

Сферичні диски в процесі руху в ґрунті мають як чисте кочення, так і кочення з ковзанням та кочення з буксуванням. На характер кочення дисків основний вплив також має величина кута атаки. При малих кутах атаки диски

через недостатній тиск на їх бокову поверхню котяться в ґрунті з ковзанням. Із збільшенням кута атаки тиск на робочу поверхню диска збільшується, в результаті спочатку відбувається зменшення ковзання дисків, а потім від кочення з ковзанням вони переходять до кочення з буксуванням. Нахилення дисків призводить до зміщення кривих в сторону більшого ковзання, при тому що нормальний тиск на диск зменшується.

Зменшення радіусу кривизни у всіх випадках викликає зміщення кривих в сторону буксування і зменшення кута атаки, який відповідає чистому коченню дисків. Це відбувається тому, що із збільшенням кривизни підвищується інтенсивність деформації ґрунту і зростає тиск на робочу поверхню. При цьому збільшується також значення проекції сили нормального тиску ґрунту на площину обертання диску, яка разом із силою тертя створює обертальний момент.

Аналіз даних показує, що поздовжнє переміщення центру ваги поперечного перерізу пласту збільшується прямо пропорційно діаметру диска (Рис. 1.13). Із збільшенням кута атаки спостерігається різке збільшення поздовжнього переміщення ґрунтової маси. Збільшення радіусу кривизни являється причиною деякого зменшення поздовжнього переміщення розпушеного ґрунту.

Рис. 1.13 Залежність поздовжнього переміщення середньої точки пласту від кута атаки, кута нахилу, глибини ходу диска і способу відвалювання пласту

Розрахунками встановлено, що питомий робочий опір диска змінюється у великих межах в залежності від кута атаки. Мінімальне значення питомого робочого опору припадає на кут атаки $25 - 35^\circ$. Збільшення питомого робочого опору при великих кутах пояснюється більш крутою постановкою робочої поверхні диска відносно руху агрегату, яка викликає більш

інтенсивну деформацію пласту і більше поздовжнє переміщення ґрунту. Нахил дисків на кут β призводить майже у всіх випадках до значного

зменшення робочого опору, оскільки при цьому відбувається більш плавне наповзання шару на диск, в результаті чого ґрунт менше деформується і переміщується в просторі на меншу відстань. Із зменшенням кута атаки різниця в величині сили питомого робочого опору у вертикальних і нахилених дисках скорочується.

Зменшення радіусу кривизни диска майже у всіх випадках призводить до росту робочого опору. При великих кутах атаки це пояснюється більш інтенсивною деформацією ґрунту дисками більшої кривизни, а при малих воно являється результатом збільшення площі контакту тильної сторони диску із стінкою борозни. Досліди з плоскими дисками показали, що їх опір набагато більше сферичних, особливо при крутій установці відносно лінії руху знаряддя.

Отримані дані показують, що максимальне значення питомої величини поперечної сили припадає на кут атаки $30 - 35^\circ$. Різке зменшення цієї сили при малих кутах атаки відбувається в результаті протитиску, створеного стінкою борозни на тильну сторону диска. При великих кутах атаки ця сила зменшується внаслідок зменшення поперечної складової нормального тиску ґрунту на диск.

Збільшення кута нахилу диска від 0 до 30° зменшує питому величину поперечної сили більш, ніж у два рази в результаті зменшення дальності поперечного відкидання пласту і розширення зони контакту тильної сторони диску зі стінкою борозни.

Зі збільшенням радіуса кривизни і зменшенням діаметру диска питома величина поперечної сили дещо зростає. Вплив діаметра і радіусу кривизни посилюється при більш пологій установці робочих органів.

Вертикальна складова реакційних сил, які діють на диски, направлена вгору і урівноважується вагою знаряддя. Основний параметр, який впливає на величину сили, є кут атаки. При малих кутах атаки сила має велику величину. Із збільшенням кута сила зменшується, а при куті атаки 45° і куті нахилу 15° вона навіть має від'ємний знак. Така залежність пояснюється тим, що при малих кутах атаки сферичний диск наближається за принципом роботи до дискового ножа, у якого вертикальна складова сили різання має велику величину, і диск виштовхується з ґрунту. Із збільшенням кута атаки вплив вертикальної складової сили різання на загальне значення сили падає, коли величина складової нормального тиску деформуючого шару на диск, направленої вниз, росте [133].

1.5 Висновки до розділу

На основі проведеного аналізу досліджень щодо формалізації процесів взаємодії робочих органів з ґрунтом встановлено, що найбільш адекватною

є формалізація ґрунту у вигляді квазісуцільного середовища з властивостями пружності, в'язкості та пластичності. При цьому механічна модель та фізичні рівняння зв'язку напружень зі швидкостями деформацій потребують уточнення з метою більш точного врахування суттєвого впливу сухого та в'язкого тертя в процесі в'язкопластичних деформацій.

Аналіз відомих досліджень взаємодії дискових робочих органів свідчить про відсутність достатньо адекватних залежностей зв'язку їх параметрів та режимів роботи, внаслідок чого з'являється досить багато технічних рішень, застосування яких дає лише локальні (у конкретних умовах) ефекти.

Досліджень щодо використання оптимальних режимів руху машинно-тракторних агрегатів для різних умов оточуючого середовища з метою зниження енергомісткості виконання технологічних операцій та процесів в галузі механізації рослинництва встановити не вдалось. Аналогічні роботи проводились лише в галузях транспорту та піднімально-транспортних машин

Мета досліджень: підвищення якості та зниження енергоємності передпосівного обробітку ґрунту під дрібнонасінневі культури шляхом обґрунтування параметрів і режимів роботи комбінованої борони.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Розробити математичну модель взаємодії комбінованої борони з ґрунтом, із урахуванням факторів впливу і умов функціонування.

2. Розробити технологічну схему деформації ґрунту і теоретично обґрунтувати форму, конструктивні параметри та режими роботи комбінованої борони, яка забезпечує підвищення якості обробітку ґрунту.

3. Оцінити ступінь зміни фізико-механічних і технологічних властивостей ґрунту при взаємодії з комбінованою бороною.

Об'єкт дослідження. Технологічний процес взаємодії комбінованої борони з ґрунтом протягом передпосівного обробітку під дрібнонасінневі культури.

Предмет дослідження. Технологічні, конструктивні параметри і режими роботи комбінованої борони для передпосівного обробітку ґрунту.

РОЗДІЛ 2 Теоретичне обґрунтування параметрів комбінованої борони

2.1 Модель взаємодії комбінованої борони з ґрунтом

Внаслідок переміщень точок ґрунтового середовища на поверхні контакту переміщуються і точки ґрунту на відстані від цієї поверхні. Швидкості зміщень цих точок на поверхні та на відстані від поверхні

контакту різні, отже диференціали швидкостей компонент переміщень точок ґрунту за відповідними напрямками визначають швидкості деформацій, які в свою чергу пов'язані з напруженнями у ґрунті через фізичні рівняння, що включають в себе механічні властивості ґрунту. Розв'язання задачі щодо розподілу напружень у ґрунті та на поверхні контакту, інтегрування яких по поверхні контакту диска з ґрунтом дозволяє визначити компоненти сил опору дискового робочого органа в залежності від геометричних параметрів, кінематичних режимів роботи та механічних властивостей ґрунту. Таким чином, в першу чергу необхідно визначити модель формалізації ґрунту та скласти фізичні рівняння зв'язку компонентів напружень зі швидкостями деформацій.

Визначення фізичних рівнянь зв'язку напружень зі швидкостями деформацій для ґрунтового середовища багатьох задачах, пов'язаних з аналізом взаємодії робочих органів з матеріалами та середовищами, виникає необхідність застосування фізичних рівнянь зв'язку напружень з деформаціями. Цей зв'язок може проявлятися у вигляді суттєвого впливу пружних, в'язких та пластичних властивостей. Для формалізації матеріалів та середовищ у вигляді моделей з суттєвим проявом окремих видів цих властивостей існують фундаментальні закони та фізичні рівняння зв'язку напружень із деформаціями (швидкостями деформацій), але при складних видах впливу властивостей, зокрема у випадках, коли проявляються всі три властивості у рівній мірі, моделі зв'язку напружень з деформаціями (швидкостями деформацій) побудовані для часткових випадків, тобто тільки для нормальних або зсувних деформацій. Якщо такі моделі побудовані для повних тензорів напружень та деформацій, то їх застосування у повному вигляді не дозволяє розв'язати задачу про напружено-деформований стан середовища або матеріалу через те, що після підстановки цих фізичних рівнянь у рівняння рівноваги середовища вони стають суттєво нелінійними та гіперболічними рівняннями у часткових похідних третього порядку.

Такі задачі (пов'язані з аналізом напружено-деформованого стану середовища) виникають, зокрема при аналізі взаємодії робочих органів машин з ґрунтом. В останньому випадку ґрунт формалізується як суцільне середовище з властивостями пружності, в'язкості та пластичності. Правомірність такої формалізації та результати аналізу взаємодії робочих органів з ґрунтом ґрунтуються на результатах досліджень [25, 26, 29, 30].

При суттєвому прояві пластичності для визначення умови пластичної течії ґрунту може бути використаний модифікований критерій переходу у пластичний стан (умова руйнування суцільності) Кулона-Мора [36]:

(2.1)

Правомірність застосування такого критерію базується на тому, що у ґрунті можуть суттєво проявлятися пластичні властивості, характерні для сипкого дискретного середовища, яким формалізують ґрунти у будівельній механіці ґрунтів, а у відповідності до висновків Хаара та Кармана [37], між механікою ґрунтів та теорією пластичності не існує різниці з точки зору зв'язків напружень з деформаціями (швидкостями деформацій).

Застосування такого критерію дозволяє визначити умови початку пластичної течії в залежності від властивостей ґрунту та гідростатичного напруження на площадках можливого ковзання, яке залежить від модуля пружності (для пружного матеріалу) та коефіцієнта в'язкості (для в'язкого матеріалу), а також величини деформації (швидкості деформації), що передували пластичному деформуванню.

Графічно модель пружно-в'язкопластичного матеріалу з таким проявом процесів деформування може бути представлена у вигляді двох послідовно з'єднаних складних тіл: пружно-в'язкого та в'язкопластичного матеріалу. Для розробки моделі та визначення фізичних рівнянь зв'язку напружень зі швидкостями деформацій необхідно ввести поняття інваріантів тензорів напружень, оскільки через величину другого інваріанта девіатора напружень визначається критерій міцності Кулона-Мора. Величина другого інваріанта девіатора має вигляд:

(2.2)

Цей інваріант із точністю до постійного множника зв'язаний з інтенсивністю зсувних напружень, які в свою чергу зв'язані з величиною, що характеризує властивості матеріалу (ґрунту) [40]:

(2.3)

Згідно з прийнятою моделлю (рис. 2.1), на першій стадії деформування відбувається в'язкопружне деформування матеріалу, який може бути формалізований паралельно з'єднаною пружиною та в'язким елементом (тіло Кельвіна-Фойгта). При виведенні рівнянь зв'язку напружень зі швидкостями деформування необхідно підсумувати напруження пружного та в'язкого деформування. Лінійно пружне середовище описується узагальненим законом Гука:

(2.4)

Залежності (2.4) можуть бути виражені через дві пружні постійні таким чином:

$$(2.5)$$

$$(2.6)$$

Рівняння (2.4) та (2.5) характеризують поведінку пружного елемента моделі

«N». Рівняння, що характеризують лінійну в'язкість «N», можуть бути виражені залежностями зв'язку напружень зі швидкостями деформацій такими залежностями [31]:

З урахуванням введених позначень вирази (2.6) набудуть вигляду:

$$(2.7)$$

Суми компонент напружень пружної та в'язкої складових можуть бути записані з урахуванням того, що компоненти деформацій та швидкостей деформацій можуть бути переписані у вигляді, зручному для розуміння, рівнянь відносно компонентів деформацій:

$$(2.8)$$

Розв'язок диференціальних рівнянь (2.8) відносно компонент нормальних деформацій має вигляд:

$$(2.9)$$

Постійні інтегрування визначаються з умови:

$$(2.10)$$

Значення компонент швидкостей нормальних в'язкопружних деформацій визначаються шляхом диференціювання по часу останніх виразів з урахуванням постійних інтегрування:

Компоненти нормальних напружень будуть виражені через компоненти швидкостей нормальних деформацій. Таким чином, середнє нормальне (гідростатичне) напруження, що стискає елемент сухого тертя в моделі Бінгама, становитиме:

$$(2.11)$$

Аналогічно визначаються компоненти швидкостей зсувних в'язкопружних деформацій, а з них компоненти зсувних напружень:

$$(2.12)$$

Час деформування, що входить в залежності зв'язку напружень зі швидкостями деформацій, може бути визначений із часу розповсюдження хвилі напружень. Швидкість розповсюдження хвилі напружень [41]:

$$(2.13)$$

Час розповсюдження хвилі:

(2.14)

де l - відстань, на якій затухає хвиля напружень у даному середовищі.

Таким чином, рівняння (2.10) разом з (2.11) визначають напруження стискання, що діють на елемент сухого тертя і входить до рівняння (2.1).

Для написання рівнянь зв'язку напружень зі швидкостями деформацій у другій частині моделі (Тіло Бінгама) необхідно підсумувати напруження пластичної течії (елемент сухого тертя Сен-Венана) та лінійно в'язкої течії (Тіло Ньютона). Рівняння пластичної течії можуть бути записані у вигляді [38]:

(2.15)

де $\dot{\epsilon}$ -- інтенсивність напружень та інтенсивність деформацій.

В останніх рівняннях можна знехтувати складовою, оскільки всебічного ущільнення (розтягнення) в процесі пластичного деформування може не відбуватися. Згідно [18], функція течії. Тут величина виражається залежністю (2.1) з урахуванням отриманого значення середнього (гідростатичного напруження для тіла Кельвіна-Фойгта (2.10)) величина функції течії (за відсутності ущільнення при пластичній течії) матиме вигляд:

(2.16)

Графічно залежність функції, що визначає умову початку течії пружно-в'язкопластичного середовища, представлена на рис. 2.2.

Постійні інтегрування визначаються аналогічно попередньому випадку і становлять:

(2.17)

Після підстановки постійних інтегрування в рівняння (2.15), диференціювання компонент деформацій по часу та вираження з них компонент нормальних напружень для пружно-в'язкопластичного середовища у відповідності до механічної моделі (рис. 2.1), останні матимуть вигляд:

(2.18)

Аналогічні перетворення, що виконані у відповідності до зсувних компонент швидкостей деформацій та напружень, дають вирази для їх зв'язку з механічними властивостями у вигляді:

(2.19)

Графічно залежності (2.16) подані на рис. 2.3.

Аналіз залежностей (2.16), (2.17) свідчить про те, що на величину напружень суттєво впливають однойменні компоненти швидкостей деформацій, в той час як інші компоненти швидкостей деформацій мають несуттєвий вплив, що дає можливість спростити фізичні рівняння за умов

практичного застосування при розв'язанні контактних задач взаємодії з пружно-в'язкопластичним середовищем деформаторів та задач аналізу напружено-деформованого стану.

Аналізуючи вплив механічних властивостей середовища, можна прийти до висновку щодо несуттєвості впливу на величину напружень початкового напруження зсуву та модуля пружності при величинах їх значень, близьких до величин, що характеризують більшість середовищ та матеріалів, з якими взаємодіють робочі органи машин (грунт, зернові матеріали, органічні та мінеральні добрива та ін.).

Слід відзначити, що при розв'язанні контактних задач одержані фізичні рівняння зв'язку напружень з деформаціями повинні бути підставлені у рівняння динаміки руху середовища, після чого отримані рівняння можуть бути розв'язані відносно кінематичних параметрів руху. Така постановка частіше всього зустрічається в задачах взаємодії робочих органів машин з матеріалами і середовищами, оскільки часто відомі лише кінематичні параметри взаємодії, і невідомою залишається динамічна реакція середовища на прикладену дію. А саме ця реакція може бути визначена шляхом розв'язання контактних задач із використанням фізичних рівнянь зв'язку напружень з вектором швидкості прикладеної дії по певній поверхні контакту та механічними властивостями середовища, а саме модулем пружності, коефіцієнтом в'язкості, кутом внутрішнього тертя та початковим напруженням зсуву.

Рис. 2.3 Залежності величини компоненти напружень від механічних властивостей матеріалу та швидкості деформування

Розроблена модель та фізичні рівняння зв'язку компонент напружень зі швидкостями деформацій для пружно-в'язкопластичного середовища з суттєвим проявом як лінійно в'язких властивостей, так і властивостей сухого тертя та пружних властивостей і з застосуванням модифікованого критерію міцності Кулона-Мора в якості функції в'язкопластичної течії, дозволяють розв'язувати задачі щодо визначення просторового напружено-деформованого стану середовищ та матеріалів, у яких проявляються властивості сухого та в'язкого внутрішнього тертя разом з пружними властивостями. Ці фізичні рівняння можуть використовуватись при розв'язаннях контактних задач взаємодії деформаторів за суттєвого впливу швидкості на напружений стан.

При розв'язанні цих задач фізичні рівняння можуть бути спрощені в залежності від суттєвості впливу тих чи інших властивостей середовищ та матеріалів.

2.2. Обґрунтування кінематичних параметрів комбінованої борони

Кінематика точок дискового робочого органу досліджувалась у фундаментальних роботах [33], Сінеокова Г.Н. [170] та інших. Суттєвим недоліком цих досліджень є визначення швидкостей переміщень точок диска у функції кутових величин повороту диска при відсутності зв'язку з системою координат ґрунтового середовища. Тобто, кінематичні параметри роботи дискового робочого органу незв'язані із системою координат середовища, з яким він контактує.

Для аналізу кінематики точок диска та точок середовища на його поверхні можна ввести такі припущення та спрощення:

–поверхня диска -- абсолютна жорстка, а точки середовища рухаються по ній у напрямках переміщення точок диска зі швидкостями, меншими на величину, яка враховує кут зовнішнього тертя ґрунту по матеріалу диска. Правомірність такого припущення базується на пропорційному впливі на зміни компонентів швидкостей ковзання в усіх напрямках;

–контакт середовища з поверхнею відбувається по частині диска, пов'язаний з глибиною ходу диска та кутами його нахилу у поздовжньо-горизонтальній та поперечно-вертикальній площинах.

Дисковий робочий орган являє собою частину сфери радіуса r , рівняння якої в системі координат (рис. 2.4) має вигляд:

$$(2.20)$$

Висота h та діаметр сектора сферичного диска зв'язані з радіусом сфери залежністю:

$$(2.21)$$

При переміщенні центра диска O у ґрунтовому середовищі зі швидкістю v , заунок взаємодії з ґрунтом, диск обертається відносно миттєвого центра обертання з кутовою швидкістю. Ця величина має вигляд:

$$(2.22)$$

де k - коефіцієнт ковзання диска при його обертанні.

s - фактичний шлях, що проходить диск в площині ріжучої кромки за один оберт.

Рис. 2.6 Залежність коефіцієнта ковзання від параметрів та режимів роботи сферичного диска (кути дані у градусах)

Дисковий робочий орган взаємодіє з ґрунтовым середовищем в системі координат. Для представлення поверхні дискового робочого органа в цій системі необхідно виконати перенос та поворот системи координат (рис. 2.7).

Рівняння переходу матимуть вигляд:

(2.23)

Компоненти швидкостей переміщень точок ґрунтового середовища на поверхні контакту диск-ґрунт в системі координат матимуть вигляд:

(2.24)-(2.29)

- найбільший вплив на зміни величин компонентів швидкостей має кут атаки, причому його зростання веде до швидкого збільшення поздовжніх та поперечних компонент та лінійного зростання вертикальної компоненти швидкостей.

2.4 Обґрунтування форми робочої поверхні

Для вирішення задачі щодо визначення напружень та сил, що діють з боку ґрунту на поверхню контакту диску, необхідно послідовно розв'язати задачу про розподіл компонент переміщень, компонент деформацій, та з використанням фізичних рівнянь зв'язку напружень з деформаціями щодо розподілу напружень у ґрунтовому середовищі перед робочим органом з урахуванням швидкості переміщення диска та механічних властивостей ґрунту. Після отримання розподілу компонент напружень шляхом інтегрування відповідних компонент напружень на поверхні контакту отримуються компоненти сил, що діють з боку ґрунту на поверхню диска. Раніше, на основі кінематичного аналізу взаємодії дискового робочого органу (2.29) були отримані функції зв'язку компонент швидкостей переміщення точок на поверхні контакту в залежності від параметрів і режимів роботи дискового робочого органу.

Для розв'язання задачі про розподіл напружень та деформацій необхідно розв'язати рівняння рівноваги середовища:

(2.30)

Підстановка у рівняння (2.30) виразів фізичних рівнянь, що отримані раніше, з урахуванням того, що швидкості деформацій виражені через компоненти переміщень, а отже виразів компонентів напружень через швидкості переміщень, дозволить прийти до виразів у вигляді еліптичних рівнянь. Так, вирази компонентів напружень (отримані раніше) мають вигляд:

(2.31)

Аналіз залежностей (2.31) (рис. 2.11) дозволив зробити висновок, що для технічних застосувань можуть бути використані спрощені залежності, які відрізняються від точних не більше, ніж на 15 %, що є достатнім для прикладного застосування.

Ці вирази мають вигляд:
У виразах для _____ для
кожної компоненти напружень:

Рис. 2.11 Залежність компонент напружень від властивостей ґрунту та швидкостей деформацій за точними виразами та спрощеними (2.32)

Вирази для похідних компонент напружень, що входять в рівняння динаміки середовища за напрямками, виражені через компоненти швидкостей переміщень, в загальному вигляді такі:

(2.33)

З урахуванням виразів (2.33) рівняння динаміки матимуть вигляд:

(2.34)

Вигляд рівнянь (2.34) дає підстави віднести їх до рівнянь еліптичного типу, а отже розв'язком цих рівнянь відносно компонент швидкостей переміщень ґрунту у напівпросторі перед робочим органом можуть бути гармонічні потенціальні функції, що задовольняють умови на границях напівпростору, що розглядається. Граничні умови для даної задачі є такими: на поверхні контакту компоненти швидкостей переміщень повинні мати величини (2.29), на відстані

-- компоненти швидкостей

переміщень прямують до 0. Таким умовам може забезпечувати фундаментальний розв'язок (гармонічна потенціальна функція) у вигляді потенціалу подвійного шару (рис.2.12).¹² Вигляд підінтегральної гармонічної потенціальної функції, що забезпечує виконання граничних умов

Крім того, однією з умов розв'язання задачі щодо знаходження швидкостей переміщень:

, а далі компонент швидкостей деформацій та компонент напружень – є умова виконання сумісності деформацій:

зв'язку з неможливістю інтегрування виразів (2.35) у загальному вигляді можна застосувати метод розв'язання подібних задач, що наведений у [87]. Він полягає в тому, що внаслідок збіжності інтегралів (2.35) можна визначити диференціальні значення компонент деформацій з підінтегральних виразів, а потім при необхідності, провести інтегрування. При цьому, оскільки в задачі стоїть необхідність знаходження напружень на поверхні контакту диск-ґрунт, то достатньо визначити і компоненти деформацій на цій же поверхні контакту. Тому можна розглядати не інтегральні функції, що визначають розподіл швидкостей переміщень, а їх підінтегральні вираз, отримані компоненти:

У деформацій у диференціальній формі. Загальний вигляд цих залежностей не приводиться через громіздкість виразів (повний їх вигляд наведений у Додатку В).

Межі інтегрування потенціальних функцій (2.35) визначаються точками перетину частини диска, що знаходиться у ґрунті, з його денною поверхнею за відповідними осями координат:

(2.38)

Координати в системі координат виражаються залежностями, що зв'язують геометричні розміри диска та кути встановлення осі його обертання:

(2.38)

ЗВ залежностях (2.37), (2.38) величина -- глибина ходу робочого органу.

Отримані компоненти деформацій у відповідності до залежностей (2.29) при визначенні

компонент деформацій на поверхні контакту диск-ґрунт, тобто при умові

. Крім того, оскільки інтегрування навіть у такому випадку в загальному вигляді неможливе в елементарних функціях через ірраціональність аргументів, функції, що підлягають інтегруванню, були розкладені в нормалізовані ряди Маклорена. Про розбіжність функцій у загальному вигляді та розкладених в ряд свідчать

графіки (рис. 2.13): розкладання в ряд по аргументах, за якими проводиться інтегрування, не впливає на вигляд функцій компонент швидкостей переміщень, що описуються точними рівняннями та функціями, які представляють розкладені в ряд Маклорена оригінали.

Уткінцевому вигляді функції деформацій після інтегрування мають вигляд:

(2.39)

Рис. 2.13 Графіки залежності компоненти швидкості переміщень на поверхні контакту, що побудовані за залежностями (2.29) та за функціями (2.39), що розкладені в ряд Маклорена

Підстановка залежностей (2.39) у фізичні рівняння зв'язку напружень зі швидкостями деформацій (2.16) дозволяє визначити компоненти напружень на поверхні контакту диск-грунт, а подальше інтегрування отриманих напружень по поверхні контакту у площинах, перпендикулярних до відповідних осей координат, дозволяє визначити компоненти сил, що виникають при переміщенні дискового робочого органу у ґрунті, тобто його реакцію на робочий орган (сили опору).

2.5 . Обґрунтування параметрів комбінованої борони

Напруження на поверхні контакту визначаються шляхом підстановки у фізичні рівняння (2.32) зв'язку напружень зі швидкостями деформацій ґрунту на поверхні контакту диск-грунт залежностей (2.39), що виражають компоненти швидкостей переміщень на поверхні контакту. Вирази компонентів напружень наведені в Додатку С.

В тексті вони не приводяться через громіздкість виразів.

Компоненти сил, що діють з боку ґрунту на дисковий робочий орган, визначаються шляхом інтегрування розподіленого по поверхні контакту тиску ґрунту (відповідних компонентів напружень) у площині, перпендикулярній відповідній осі.

Так, опір ґрунту переміщенню робочого органу - це інтегральна функція розподілу тиску (компоненти напруження) по частині площини , що

знаходиться в контактi з диском. Інтегрування здійснюється в площині, тобто перше інтегрування по осі:

(2.40)

- межі інтегрування в системі координат по осі при значеннях.

Друге інтегрування здійснюється для суми перших двох інтегралів по осі: у зв'язку зі складністю аналізу виразів (2.40) на рис. 2.14 – 2.15 представлена графічна інтерпретація залежностей на прикладі складової тягового опору.

Як свідчить аналіз останніх залежностей (рис. 2.14—2.15), суттєвий вплив на опір ґрунту при роботі дискового робочого органа чинять як механічні властивості самого ґрунту, так і геометричні та кінематичні параметри дискових робочих органів, зокрема:

–модуль пружності ґрунту, коефіцієнт внутрішнього тертя та граничне напруження зсуву ґрунту після руйнування його суцільності в широких межах його існування не має суттєвого впливу на опір ґрунту переміщенню робочого органа; ці величини впливають на величину межі руйнування суцільності ґрунту, яка після настання цього стану залишається практично незмінною величиною;

–разом з тим, коефіцієнт в'язкості, що характеризує в'язке тертя ґрунту має суттєвий вплив на опір, особливо зі зростанням поступальної швидкості;

–разом з тим, суттєвий вплив на витрати енергії (опір ґрунту) чинять параметри і режими роботи дискового робочого органу: так, за рахунок раціонального вибору кривизни диска, та кутів установки осі обертання та можна знизити тяговий опір до 40 %;

–крім того, за великих значень коефіцієнта в'язкості ґрунту суттєвого зниження тягового опору можна досягти підбором раціональної швидкості поступального руху.

Останній висновок дає підстави для пошуку оптимальної швидкості поступального руху агрегату (рис.2.14).

Рис. 2.14 Залежності тягового опору від механічних властивостей ґрунту

Рис. 2.15 Залежності тягового опору від конструктивних параметрів

2.6 Динамічні параметри комбінованої борони

Комплектування машинно-тракторних агрегатів здійснюється за умови забезпечення оптимального завантаження робочими машинами

мобільних енергетичних засобів. В якості критерію оптимізації застосовують, як правило, рівень завантаження двигуна, не враховуючи при цьому швидкісний режим руху агрегату, який вибирається оператором індивідуально з урахуванням його кваліфікації. При такому підході витрата енергії при виконанні технологічної операції з використанням мобільного агрегату може суттєво перевищувати енергію, необхідну для якісного виконання процесу з дотриманням агротехнічних вимог. Збільшення її витрат проявляється суттєво при виконанні операцій на полях з вираженим рельєфом (знакозмінним кутом нахилу поверхні поля у вертикально - поздовжній площині). Тому задача оптимізації режимів руху машинно-тракторного агрегату при виконанні ним операцій технологічного процесу є актуальною і своєчасною. Посилення вимог до якості виконання польових робіт, підвищення врожайності та екологічної безпеки, вимагає розробки прогресивних форм організації праці, вдосконалення як основного енергетичного засобу, так і технологічної машини, що входить до складу машинно-тракторного агрегату (МТА).

Аналіз стану питання розвитку МТА показав, що на сучасному етапі основна увага приділяється вдосконаленню енергетичних засобів та підвищенню їх потужності для забезпечення надійної роботи технологічних машин. Але це неминуче призводить до зростання експлуатаційної маси МТА і, як наслідок, до збільшення енергетичних витрат на виконання технологічного процесу [132, 149].

Одним з основних резервів зниження витрат енергії є оптимізація швидкісного режиму руху МТА з урахуванням рельєфу поля у вертикально-поздовжній площині.

Для розв'язання задачі оптимізації режимів руху машинно-тракторного агрегату (МТА) необхідно розглянути динаміку його переміщення по поверхні поля. Схема профілю поля та сили, що діють на агрегат, представлені на рис. 2.16.

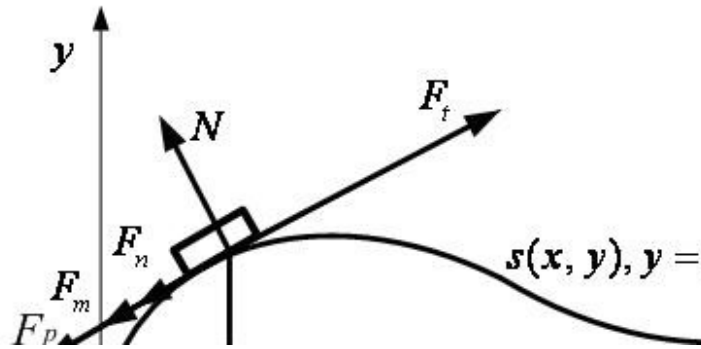


Рис. 2.16 Схема до складання рівняння руху МТА

Рівняння руху агрегату в проекції на натуральні вісі координат, тобто на траєкторію руху по поверхні поля, матиме вигляд:

$$(2.41)$$

$$(2.42)$$

При визначенні мінімуму підінтегральної функції, а саме функціонала сил опору, необхідно накласти додаткові умови, тобто обмеження, при яких необхідно розв'язувати варіаційну задачу щодо визначення функції швидкості руху агрегата, яка дасть мінімум функціоналу (2.43). Таким обмеженням (додатковою умовою може бути різниця сил опору та рушійної сили, помножена на коефіцієнт Лагранжа) є:

$$(2.43)$$

обмеженнями (2.44) функціонал роботи сил опору (2.43) переміщення агрегату на шляху прийме вигляд:

$$(2.44)$$

Якщо помножити і розділити останній вираз на , то враховуючи, що , цей вираз може бути переписаний у вигляді:

$$(2.45)$$

$$(2.46)$$

Оскільки функціонал (2.45), з урахуванням останнього виразу (2.46) містить незалежні функції та , то зручно проводити пошук мінімуму проекції швидкості на Декартовій системі координат. Якщо спроектувати складові виразу (2.45) на вісь то функціонал набуде вигляду:

$$(2.47)$$

Рис. 2.18 Залежність швидкості переміщення агрегату від рельєфу поля

2.7. Висновки до розділу

Аналіз поверхні (рис. 2.18) показує, що кут нахилу поверхні поля має суттєвий вплив на швидкісний режим руху мобільного агрегату.

Енергія, що витрачається при виконанні технологічної операції (обробіток ґрунту дисковим робочим органом), визначається залежністю (2.45).

При використанні оптимальної швидкості для даного рельєфу поля та при певних параметрах, режимах роботи агрегату і обмеженнях, що накладаються на тягову потужність, та при постійній швидкості його руху витрата енергії суттєво відрізняється. При цьому, за умов більшого запасу тягової потужності економія енергії стає суттєвішою. Для порівняння, при тяговій потужності 50 кВт та проходженні ділянки з нахилом вгору, прямолінійної та нахилом донизу за однаковий час різниця енергії представлена на рис. 2.17.

Співвідношення між енергією виконання операції при використанні оптимального швидкісного режиму та режиму руху з постійною поступальною швидкістю (тягова потужність) за однаковий час проходження шляху

Методом варіаційного числення розв'язана задача оптимізації режиму руху агрегату по поверхні поля з урахуванням рельєфу.

Таким чином, отримана залежність швидкості руху агрегату від зміни кута нахилу поверхні поля в напрямку руху, опору переміщення МТА та опору робочих органів при накладеному обмеженні потужності двигуна, приведений до рушіїв. Даний розв'язок може бути використаний при автоматичному керуванні режимом руху агрегатів. За підстановки рівняння коефіцієнтів параметрів, що характеризують рух інших типів транспортних засобів, рішення можна використовувати для оптимізації режимів їх руху.

РОЗДІЛ 3. Методика проведення та результати досліджень

3.1. Методика проведення досліджень

Програмою досліджень передбачалось:

визначення основних показників якості обробітку ґрунту (коефіцієнт структурності, твердість, щільність та вологість ґрунту, рельєф поверхні поля);

визначення механічних властивостей ґрунту: модуль пружності - коефіцієнт Пуассона; коефіцієнт в'язкості об'ємних деформацій; початкове напруження зсуву; кут внутрішнього тертя ґрунту - , при виконанні операції обробітку ґрунту дисковими робочими органами;

визначення тягового опору дискових робочих органів в залежності від конструктивних параметрів і кінематичних режимів роботи та механічних

властивостей ґрунту з метою встановлення адекватності отриманих аналітичних залежностей;

визначення числових значень механічних та фізико-механічних властивостей ґрунту після обробітку (граничних напружень зсуву структури ґрунту, приросту пористості та модуля деформації ґрунту);

визначення енергетичних показників роботи машинно-тракторного агрегату з дисковими ґрунтообробними робочими органами при різних параметрах агрегату, кінематичних режимах та різних кутах нахилу профілю поля з метою встановлення адекватності отриманих теоретичних залежностей для визначення оптимального швидкісного режиму руху агрегата.

Рис. 3.1 Підготовка ґрунтообробного агрегату до проведення експериментальних досліджень

Для проведення досліджень використовували лише центральну (середню) секцію дискової борони, на якій було встановлено дві передні секції, диски в яких розміщені ввігнутою стороною назовні, та дві задні секції зі зворотнім розміщенням дисків. Бокові секції дискової борони були демонтовані, тому ширина захвату дискової борони знаходилася в межах 3,0 м.

Технічна характеристика дискової борони наведена в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Технічна характеристика дискової борони

Для визначення адекватності отриманих теоретично залежностей щодо визначення оптимального швидкісного режиму застосовувався агрегат у складі мобільного енергозасобу, підвищеного шляхом додавання тягового модуля зі зчепленим із ним машинно-тракторним агрегатом, що обладнаний дисковими робочими органами (рис. 3.2). Тягове зусилля при цьому вимірювалось на гаку тягового модуля. Для проведення цих експериментів вибиралися ділянки поля з необхідним нахилом поверхні.

Рис. 3.2 Загальний вигляд установки для визначення енергії руху при різних кінематичних режимах

Фізичні рівняння зв'язку напружень із деформаціями, а отже й кінцеві рівняння зв'язку тягового опору з параметрами та режимами роботи дискових робочих органів ураховують механічні властивості ґрунту. Ці властивості можуть бути визначені на основі проведення лабораторних випробувань ґрунту або досить трудомістким визначенням окремих показників у польових

умовах. Крім того, можуть бути використані методи польових експериментальних досліджень механічних показників, що запропоновані [89]. Такі методи потребують окремих досліджень кожного параметра.

Разом з тим, результатами досліджень [89] встановлені регресійні залежності, що дозволяють визначити механічні властивості ґрунту за результатами визначення фізико-механічних властивостей для кожного (за механічним складом) з типів ґрунтів, що характерні для України. Ці регресійні залежності для різних суглинків мають вигляд:

$$\text{Модуль пружності легкосуглинкового ґрунту:} \quad (3.1)$$

$$\text{Модуль пружності середньосуглинкового ґрунту:} \quad (3.2)$$

$$\text{Модуль пружності важкосуглинкового ґрунту:} \quad (3.3)$$

$$\text{Модуль в'язкості при об'ємних деформаціях легкосуглинкових ґрунтів:} \quad (3.4)$$

$$\text{Модуль в'язкості при об'ємних деформаціях середньосуглинкових ґрунтів:} \quad (3.5)$$

$$\text{Модуль в'язкості при об'ємних деформаціях важкосуглинкових ґрунтів:} \quad (3.6)$$

$$\text{Модуль в'язкості при зсувних деформаціях легкосуглинкових ґрунтів:} \quad (3.7)$$

$$\text{Модуль в'язкості при зсувних деформаціях середньосуглинкових ґрунтів:} \quad (3.8)$$

$$\text{Модуль в'язкості при зсувних деформаціях важкосуглинкових ґрунтів:} \quad (3.9)$$

$$\text{Граничне напруження зсуву для легко суглинкових ґрунтів} \quad (3.10)$$

$$\text{Граничне напруження зсуву для середньосуглинкових ґрунтів} \quad (3.11)$$

$$\text{Граничне напруження зсуву для важкосуглинкових ґрунтів:} \quad (3.12)$$
$$\text{Коефіцієнт внутрішнього тертя для легкосуглинкових ґрунтів} \quad (3.13)$$

$$\text{Коефіцієнт внутрішнього тертя для середньосуглинкових ґрунтів} \quad (3.14)$$

Коефіцієнт внутрішнього тертя для важкосуглинкових ґрунтів:

(3.15)

Графічно залежності механічних властивостей від фізико-механічних параметрів ґрунту наведені на рис. 3.3.

За наведеними рівняннями на основі отриманих значень густини ґрунту та його вологості для важкосуглинкового ґрунту були визначені механічні властивості ґрунту, на якому проводились експериментальні дослідження.

Рис. 3.3 Залежності механічних властивостей від фізико-механічних параметрів ґрунту

3.2. Результати досліджень

Визначення тягового опору машини з дисковими робочими органами проводилось методом тензометрування [127, 140], при цьому фіксувалась та вимірювалась горизонтальна складова сил опору в залежності від кута атаки та глибини обробітку ґрунту, та швидкості руху агрегата. Ці дослідження проводились в польових умовах. Тяговий опір машини реєструвався тензоланкою (рис. 3.7).

Тарування тензоланцюга проводилось в лабораторних умовах на розривній машині (рис. 3.8) з використанням тієї ж реєстраційної апаратури, що й у польових умовах, а саме: тензоланка, аналогово-цифровий перетворювач з підсилювачем, комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням, що дозволяв вести запис у реальному часі у цифровому вигляді.

Рис. 3.7 Тензоланцюг між скобами трактора та борони

Рис. 3.8 Тензоланцюг, тарування, апаратура для запису сигналу

Для визначення адекватності отриманих аналітичних виразів, що дозволяють знайти оптимальний швидкісний режим руху машинно-тракторного агрегату з дисковими робочими органами, необхідно було визначити сумарний опір переміщення агрегату для конкретних умов, а саме:

механічних властивостей ґрунту: модуля пружності E , коефіцієнта в'язкості η , кута внутрішнього тертя ϕ , початкового напруження зсуву τ_0 ;

параметрів і режимів роботи дискової борони: кута атаки , кута нахилу осі обертання диска до горизонтальної площини , діаметра диска, радіуса кривизни диска , глибини ходу робочих органів , поступальної швидкості машинно-тракторного агрегату; кута нахилу поверхні поля.

Для проведення досліджень сумарного тягового опору були вибрані три ділянки поля: з горизонтальною ділянкою, ділянка під уклін та ділянка з підйомом. Ділянки обирались таким чином, щоб на них можна було заміряти сумарний тяговий опір при постійній швидкості на протязі 100 м.

Швидкість проходження ділянки визначалась з використанням виразів щодо визначення оптимальної швидкості руху для конкретних умов (залежність 2.52 разом з 2.40).

Для заміру сумарного тягового опору використовувався агрегат у зчіпці з тяговим модулем та МТА, між якими був встановлений динамометр.

Агротехнологічні умови проведення досліджень наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Агротехнологічні умови проведення досліджень

Назва показника	Позначення	Одиниця виміру	Значення
Тип ґрунту	Важкосуглинковий темно-каштановий		
Вміст гумусу		%	до 3
Густина ґрунту	ρ	кг/м ³	1500
Коефіцієнт (кут) внутрішнього тертя		град.	60
В'язкість ґрунту		кПа*с	102
Початкове напруження зсуву ґрунту		кПа	250
Коефіцієнт Пуассона			0,41
Модуль пружності		Па	1,5*10 ⁷
Середня вологість ґрунту		%	7,3

Для визначення витрат енергії на обробіток ґрунту дисковими батареями між причіпним пристроєм енергетичного засобу (трактор ХТЗ-16171) та причіпним пристроєм борони був змонтований тензодинамометр і на горизонтальній ділянці поля на заліковому відрізку (100 м) був проведений запис значень тягового зусилля. Швидкість руху агрегату становила _____ м/с при глибині обробітку ґрунту _____ м.

В результаті обробки (з використанням стандартних пакетів на комп'ютері) результатів тензометричного динамометрування була побудована осцилограма варіювання тягового зусилля в часі і визначено його середнє значення (рис. 4.1).

Аналіз графіка (рис. 4.1) показав, що опір переміщенню робочих органів в ґрунті на горизонтальній ділянці поля при значних коливаннях миттєвих значень в середньому залишається постійним впродовж всієї залікової ділянки.

Співставлення результатів тензометричного динамометрування з теоретичними дослідженнями дискових робочих органів дозволило зробити

висновок про адекватність результатів теоретичних досліджень (складова

опору ґрунту визначена за залежністю (2.41) при однакових значеннях аргументів, що входять до залежності) щодо визначення опору ґрунту переміщенню дискових робочих органів з рівнем надійної ймовірності для конкретної кількості ступенів вільності.

Аналогічна залежність відслідковується і за умов роботи агрегату на схилах (до 10°), причому, при переміщенні вниз (рис. 4.2) середнє значення

тягового зусилля дещо менше, ніж при підйомі агрегату вгору (рис. 4.3). Це

пояснюється зниженням тягового зусилля на перекочування опорних коліс

дискової борони.

Рис. 4.1 Характерна осцилограма тягового зусилля на переміщення дискової борони в часі при роботі на горизонтальній ділянці поля

Результати експериментальних досліджень визначення тягового опору МТА свідчать, що теоретичні залежності для визначення оптимального швидкісного режиму адекватні при рівні надійної ймовірності 0.9.

Загальні висновки

1. Розроблена математична модель взаємодії комбінованої борони з ґрунтом з урахуванням факторів, що впливають і умов функціонування.

2. Розроблено технологічну схему деформації ґрунту і теоретично обґрунтовані:

- форма - спіральна, з закріпленими зубами краплеподібної форми;
- конструктивні параметри борони: $D = 180 \dots 190$ мм, ширина захвату $B = 900$ мм, крок спіралі $S_{\text{спіралі}} = 25 \dots 30$ мм, кількість зубів $K_z = 24 \dots 26$ шт/м, відношення діаметру борони до ширини витка $D / b = 10$;
- режими роботи - кінематичний режим $\lambda = 1,25 \dots 1,3$, маса борони $G_{\text{бор}} = 500 \dots 600$ Н, поступальна швидкість $V = 2,5 \dots 2,7$ м/с.

3. Застосування комбінованої борони сприяє підвищенню польової схожості, у порівнянні з контролем, на 9,5%, і зниженню вегетаційного періоду на 4 - 5 днів.

4. Дослідженнями виявлено що урожайність збільшиться при використанні комбінованої борони в складі блочно-модульного адаптера до 10%.

5. Встановлено, що збільшення поступальної швидкості борони призводить до зниження ступеню ущільнення насінневого ложа до $1,25 \dots 1,27$ г/см³, при незначному збільшенні вологості на 2,5 ... 4,2%. Міцність ґрунту на стиск при використанні комбінованої борони знизиться до 65...75кПа, на розтяг - на 7 ... 10%, і складе 8 ... 10 кПа. Виявлено зниження липкості ґрунту до 5 г/мм², опору зсуву - до 9 кПа.

6. Оцінка передпосівного обробітку ґрунту комбінованою бороною показує на зменшення енергоємності процесу до 10%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основні вимоги до обробітку ґрунту та сівби. Журнал «Агробізнес Сьогодні». 2020. №10 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/14498-osnovni-vymohy-do-obrobitku-gruntu-ta-sivby.html>

2. Застосування способів основного обробітку ґрунту в сівозмінах/ В.М.Кабанець, М.Г.Собко, О.В.Радченко/під ред. М.Г. Собка. Сад, 2015. 16 с.
3. Калетнік Г.М Використання сучасних методів механіки для сільського господарства // Г.М. Калетнік, О.М Черниш, М.Г Березовий / Збірник наукових праць ВНАУ. В.: Вінниця, 2011.Т1 (65). С.8-18.
4. Гуцол О. П., Ковбаса В. П. Обґрунтування параметрів і режимів руху ґрунтообробних машин: Монографія. Київ, 2016. 145 с.
5. Відтворення родючості ґрунтів у ґрунтозахисному землеробстві. Наукова монографія / Національний аграрний університет. Під ред. Н.К. Шикули. Київ. ПФ «Оранта», 2018. 680с.
6. Шевченко І.А. Керування агрофізичним станом ґрунтового середовища. К.: Видавничий дім «Вініченко», 2016. 320 с.
7. Булгаков В.М., Цурпал І.А., Шелудченко Б.А. Факторно технологічна модель динаміки ґрунтових структур та її аналіз . Наук. вісник НАУ. 1998. №3. С. 139-143.
8. Булгаков В.М., Шелудченко Б.А. Самоорганізація ґрунтових структур. Київ: Видавництво НАУ, 1998. 58с.
9. Шустік Л. Техніка для передпосівного обробітку ґрунту // Пропозиція, 2015. №1. С.44 - 51.
10. Мойсеєнко В., Дудака С. Огляд комбінованих ґрунтообробних агрегатів // Пропозиція, 2017. №8. С.22 - 30.
11. Про охорону земель: Закон України від 19.06.2003р № 962-IV, ВВР, 2003, № 39, ст.349 зі змінами від 20.09.2019р. [№ 124-IX](#), ВВР, 2019, № 46, ст.295.
12. Дьянго Хегглін, Моріс Клерк, Хансуелі Дірауер Мінімальний обробіток ґрунту (Reduzierte Bodenbearbeitung): Підручник. FiBL Ukraine, 2016. 316с.
13. Середа Л.П., Швець Л.В., Швець О.І. Розробка культиватора для нових технологій обробітку ґрунту. *Всеукраїнський науково-*

технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК». Вінниця, 2020. №3(110). С.117-125с.

14. Василенко П.М. Введение в земледельческую механику / под ред. Л.В. Погорелого. К.: Сільгоспосвіта, 1996. 251 с.

15. Ветохін В.І. Системні та фізико-механічні основи проектування розпушувачів ґрунту : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук / В.І. Ветохін; ННЦ ІМЕСГ. Глеваха, 2010. 40 с.

16. Ковбаса В.П. Механіко-технологічне обґрунтування оптимізації взаємодії робочих органів з ґрунтом : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук. К., 2006. 35 с.

17. Пришляк В.М. Умови експлуатації і основні причини виходу з ладу ріжучих елементів робочих органів сільськогосподарських машин / В.М. Пришляк, В.М. Яропуд // *Збірник наукових праць ВНАУ*. В.: Вінниця, 2010. №5. С.117-119.

18. Спирін А.П. Мульчирующая обработка почвы. М.: ВИМ, 2001. 135с.

19. Stroppel A. Soil tillage machines of the future. 25 Symposium “Actual Tasks on Agricultural Engineering”, Opatija, Croatia, 1997. P.57-60.

20. Калетнік Г. М. Основні питання розвитку галузі механізації сільського господарства в Україні / Калетнік Г М., Адамчук В.В., Булгаков В.М., Крючев В.М., Надикто В.Т. // *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК»*. Вінниця, 2016. №3(95). С.6-13с.

21. Сисолін П.В. Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування. Машини для рільництва: підручник / Сисолін П.В., Сало В.М., Кропівний В.М.; за ред. М.І. Черновола. К.: Урожай, 2001. Кн. 1. 384 с.

22. Булгаков В.М. Прикладна механіка: Навчальний посібник. / Булгаков В.М., Адамчук В.В., Черниш О.М., Березовий М.Г., Калетнік Г.М., Яременко В.В. Київ: Аграр. наука, 2016. 816 с.

23. Войтюк Д. Г., Булгаков В. М., Кропивко С. В., Онищенко В. Б. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку: підруч. для студ. вузів. Київ : Друк, 2005. 464 с.

24. Aliev E.B., Bandura V.M., Pryshliak V.M., Yaropud V.M., Trukhanska O.O. Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. INMATEH - Agricultural Engineering. 2018. Vol. 54, No1. P.95-104.

25. Kaletnik H., Adamchuk V., Bulgakov V., Kyurchev V., Nadykto V. Main problems in the field of agricultural mechanization in Ukraine. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2016. No3. С. 6-12.

26. Швець Л.В., Паладійчук Ю.Б., Труханська О.О. Технічний сервіс в АПК. Том І. Навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ, 2019. 647с.

27. Калетнік Г.М. Основи інженерних методів розрахунків на міцність та жорсткість. Ч.І, ІІ: Підручник / Г.М. Калетнік, М.Г. Чаусов, В.М. Швайко, В.М. Пришляк та ін.; за ред. Г.М. Калетніка, М.Г. Чаусова. К.: Хай Тек-Прес, 2011. 616 с.

28. Калетнік Г.М., Булгаков В.М., Черниш О.М., Кравченко І.Є., Солоня О.В., Цуркан О.В. Технічна механіка. Підручник. Київ : «Хай-Тек-Прес», 2011. 340 с.

29. Солоня О.В., Купчук І.М. Практикум з Теорії механізмів і машин : навчальний посібник. Вінниця : Друк, 2020. 250 с.

30. Сивак Р.І., Деревенько І.А. Короткий курс теоретичної механіки. Вінниця: ТОВ «Вінницька міська друкарня», 2016. 200 с.

31. Пат. № 2825 МПК А01В21/06, 33/06. Комбинированное почвообрабатывающее орудие / Зубиков Ф.Ф., Рехлицкий О.В., Шуринов В. А., Добышев А. С. / заявник і патентовласник Білоруська державна сільськогосподарська академія. № u20050614 ; заявл. 14.10.05 ; опубл. 14.06.06. Бюл. № 1.

32. Пат. №89245 Комбінований ґрунтообробний агрегат для мульчування і заробки рослинних та стерньових решток / Янчук Я.М.,

Середа Л.П., Іванов М.І., Зінев М.В., Руткевич В.С. / заявник і патентовласник Вінницький національний аграрний університет. № u 2013 13921; заявл. 02.12.13; опубл. 10.04.14. Бюл.№7.

33. Середа Л.П., Труханська О.О., Швець Л.В. Розробка і дослідження ґрунтообробної машини для технології strip-till з активними фрезерними робочими органами. *Всеукраїнський науково-технічний журнал "Вібрації в техніці та технологіях"*. Вінниця, ВНАУ, 2019. №4(95) С. 65-71.

34. Середа Л.П. Технологія strip-till в рослинництві. Перспективність впровадження в Україні. *Матеріали XX Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки», присвяченої 119-й річниці з дня народження академіка П.М. Василенка, 17-19 жовтня 2019р.* м. Миколаїв., 2019. С.70-71.

35. Войтюк Д.Г., Гаврилюк Г.Р. Сільськогосподарські машини: Підручник. – К.: Каравела, 2004. 552с.

36. Ільченко В.І., Нагірний Ю.П., Джолос П.А. та ін. *Машиновикористання в землеробстві*. К.: Урожай, 1996. 205с.

37. Сало В.М., Лещенко С.М., Лузан П.Г. Машини для обробітку ґрунту та внесення добрив. Навчальний посібник для студентів агротехнічних спеціальностей. / за ред. Сало В.М. Х.: Мачулін, 2016. 244 с.: іл.

38. Колмаков П.П., Нестеренко А.М. Минимальная обработка почвы. - М.: Колос, 1981. 252 с.

39. Мазитов Н.К. Ресурсосберегающие почвообрабатывающие машины. - Казань, 2003. 456 с.

40. Нарциссов В.П. Научные основы систем земледелия. М.: Колос, 1982. 236 с.

41. Lemken. The agrovision company. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://lemken.com.ua/ua/prospekti>

42. Ковбаса В.П. Механіко-технологічне обґрунтування оптимізації взаємодії робочих органів з ґрунтом: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.05.11/ Ковбаса Володимир Петрович; Нац. аграрн. ун-т. К., 2006. 35 с.

43. Сысолин П.В. Почвообрабатывающие и посевные машины / П.В.Сысолин, Л.В.Погорелый. К.:Феникс, 2005.264 с.

44. Сисолін П.В. Сільськогосподарські машини: Теоретичні основи, конструкція, проектування/ П.В.Сисолін, В.М.Сало, В.М.Кропівний. К.: Урожай, 2001. Книга 1. 382 с

45. Бурченко П. Н. Основные технологические параметры почвообрабатывающих машин нового поколения // Теория и расчет почвообрабатывающих машин: М., 1999. Т. 1. С.12-43.

46. Хайлис Г.А. Основы теории и расчёта сельскохозяйственных машин.- К: Изд. УСХА, 1992. 240с.

47. Ветохин В.И. Модель крошения почвы под действием клина // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1994. №10. С.25-27.

48. Труханська О.О. Підвищення якості ремонту і технічного обслуговування сільськогосподарської техніки. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. №3. С. 109-119.

49. ДСТУ 4397:2005. Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробовування. К.: Держспоживстандарт, 2005.16с.

50. ОСТ 70.4.1-80. Испытание сельскохозяйственной техники. Машины и орудия для глубокой обработки почв. Программа и методика испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1981. 154 с.

51. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий /Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. М.: Наука, 1996. 280 с.

52. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б.А. Доспехов. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

53. Бандура В.М., Курило В.Л., Серета Л.П., Пришляк В.М., Швець Л.В. Методичні рекомендації до написання й оформлення магістерських робіт магістрантами денної та заочної форм навчання інженерно-технологічного факультету спеціальності 208 «Агроінженерія» галузі знань 20 «Аграрні науки та продовольство». Вінниця: ВНАУ, 2019. 39с.

54. Яворский В.А. Планирование научного эксперимента и обработка экспериментальных данных / В.А. Яворский. М., 2006. 45 с.

55. Зеленин А. Н. Физические основы теории резания грунтов: научное издание / А. Н. Зеленин. - М.; Л.- 1950. - 354 с.

56. Василенко П.М. Основы научных исследований. Механизация сельского хозяйства / П.М. Василенко, Л.В. Погорелый. – К.: Вища школа, 1985. – 266 с.

57. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Адлер Ю.П., Марков Е.В., Грановский Ю.В. – М.: Наука, 1976.–279 с.

58. Крутов В.И. Основы научных исследований / В.И. Крутов, В.В. Попов; под ред. В.И. Крутова. – М. : Высшая школа, 1989.–363 с.

59. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментальных исследований и обработки данных / Веденяпин Г.В.– М.:Колос,1973.–159с.

60. Кирюшин В. И. Экологические основы земледелия /А. И. Кирюшин. -М.: Колос, 1996. - 367 с.