

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний аграрний університет
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Допущений до захисту:
завідувач кафедри

«_____» листопада 2020 р.

«ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
ГЛИБОКОРОЗПУШУВАЧА ҐРУНТУ»

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
за спеціальністю 208 Агроінженерія

Виконав: студент групи 62-АІ
Заболотний Костянтин Васильович
Керівник: к.т.н., доцент
Швець Людмила Василівна

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії і технічного сервісу

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

“ _____ ” _____ 2020р.

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

магістранту _____ Заболотному Костянтиу Васильовичу _____

на тему:

«ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
ГЛИБОКОРОЗПУШУВАЧА ҐРУНТУ»

Затверджена наказом по університету від 26.02.2020р № 35 м

Вихідні дані для роботи:

1. Методичні вказівки з виконання магістерської роботи.
2. План магістерської роботи.
3. Підручники і навчально – методичні посібники, статистичні дані.
4. Наукові видання (монографії, книги, збірники, журнали, патенти) щодо трелювальних засобів та лісового господарства.
5. Методика економічної оцінки результатів досліджень.

Календарний план виконання магістерської роботи

СТРУКТУРА РОБОТИ	Обсяг, стор.	Термін підготов- ки
РЕФЕРАТ	3	травень
Розділ I. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ, МЕ- ТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ	22	червень
Розділ II. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОЧОГО ОРГАНА ЯРУСНОГО ГЛИБО- КОРОЗПУШУВАЧА	22	липень
Розділ III. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	40	вересень
Розділ IV. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕН- ТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	19	жовтень
ВИСНОВКИ	2	листопад
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	8	листопад

ТЕРМІН ПОДАННЯ РОБОТИ НА КАФЕДРУ

для попереднього захисту 20.11.2020р.

дата видачі завдання 06.05.2020р.

Керівник _____ / Л.В. Швець /
(підпис)

Завдання прийняв до виконання _____ / К.В. Заболотний /
(підпис)

РЕФЕРАТ

ЗАБОЛОТНИЙ Костянтин Васильович. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів глибокорозпушувача ґрунту. Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 208 – Агроінженерія.

Актуальність теми. Аналіз стану сільськогосподарських земель Західного Полісся свідчить про наявність значної кількості перезволожених важких ґрунтів з незадовільними водно-фізичними властивостями [19, 42]. Це призводить до зниження їх родючості і врожайності вирощуваних культур.

Дослідженнями встановлено, що довготривале використання на староорних землях енергонасиченої техніки [46] веде до утворення “підорної підшви” і надмірного ущільнення підорного шару на глибину від 0,4 до 1,2. Наслідком цього є зниження живильних, фільтраційних та протиерозійних властивостей ґрунтів.

Для покращення фізичного стану ґрунту в умовах надлишкового зволоження чи ущільнення раз на три роки проводять глибоке розпушення ґрунту. Воно передбачає розпушення підорного шару ущільненого ґрунту на необхідну глибину, що підвищує ефективність орного родючого шару і покращує фільтраційні властивості підорних шарів.

З цією метою застосовують здебільшого глибокорозпушувачі безвідвального типу [20, 30]. Однак, до цього часу розробка їх конструкцій, в переважній більшості, проводилась з позицій зменшення тягового опору [26], і в меншій мірі – з позицій досягнення якісних показників роботи. В їх параметрах не в повній мірі враховані вимоги до якості обробітку орного та підорних шарів [32, 48]. За існуючими технологіями необхідна якість розпушення орного та підорних шарів досягається використанням комбінації декількох видів обробітку, що призводить до додаткових енерговитрат [12,16]. Крім того, існуючі ґрунтообробні органи зумовлюють об’ємні деформації, які збільшують непродуктивні енерговитрати.

У зв’язку з цим актуальною задачею на даний час, є розробка високоефективних глибокорозпушувачів, які б дозволили, на основі врахування різних

грунтових умов в орному та підорному шарах, покращити показники розпушення ґрунту [13, 15].

Мета і задачі досліджень. Метою роботи було підвищення ефективності глибокого розпушення ґрунту на основі створення нового ярусного робочого органа глибокорозпушувача з обґрунтуванням його конструктивно-технологічних параметрів на підставі врахування фізико-механічних характеристик ґрунту в орному та підорних шарах.

Для досягнення поставленої мети вирішенню підлягали наступні задачі:

- проаналізувати чинні способи і засоби глибокого розпушення перезволожених та ущільнених ґрунтів, з'ясувати недоліки та обґрунтувати напрями їх усунення;
- теоретично й експериментально обґрунтувати форму та параметри ґрунторозпушувальних поверхонь ярусного глибокорозпушувача, а також їх просторове розміщення в напрямку руху машини з врахуванням різних ґрунтових умов в орному та підорних шарах;
- розробити інженерну методику проектування та розрахунку ярусних глибокорозпушувачів;

Об'єкт досліджень – процес глибокого ярусного розпушення ґрунту та технічні засоби для його здійснення.

Предмет досліджень – вплив характеристик ґрунтового середовища і конструктивно-технологічних параметрів робочого органа ярусного глибокорозпушувача на кількісні та якісні показники розпушення ґрунту.

Методи досліджень. Теоретичні дослідження базувались на загальних положеннях землеробської механіки, елементах теорії суцільного середовища, теорії міцності Кулона-Мора. Аналітично-графічний аналіз математичних моделей виконувався за допомогою візуального їх відтворення у просторі та часі на ПЕОМ з використанням прикладних (MS Excel-2000, MathCAD Professional-2001, T-Flex CAD-7.0, КОМПАС-5.10-3D та ін.).

ЗМІСТ

	стор
1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ, МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ	- 7
1.1. Аналіз існуючих видів глибокого розпушення ґрунту	- 8
1.2. Аналіз критеріїв оцінки якості розпушення	- 11
1.3. Обґрунтування раціонального способу подрібнення ґрунту	- 15
1.4. Визначення напрямків покращення ефективності розпушення ґрунту існуючими робочими органами	- 19
1.5. Висновки, мета та задачі досліджень	- 24
2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОЧОГО ОРГАНА ЯРУСНОГО ГЛИБОКОРОЗПУШУВАЧА	- 26
2.1. Теоретичні передумови до обґрунтування ґрунторозпушувальної поверхні	- 26
2.2. Визначення та аналіз математичної моделі форми ґрунторозпушувальної поверхні	- 35
2.3. Визначення основних параметрів ґрунторозпушувальної поверхні	- 41
2.4. Обґрунтування просторового рознесення ґрунторозпушувальних поверхонь ярусного глибокорозпушувача в площині руху	- 50
2.5. Висновки до розділу	- 71
3. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	- 73
3.1. Програма експериментальних досліджень	- 73
3.2. Характеристика об'єктів дослідження	- 73
3.3. Опис експериментальних установок, які застосовуються для лабораторних і польових досліджень	- 74
3.4. Схеми вимірювань, техніка проведення досліджень та обробки експериментальних даних	- 80
4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	- 82
4.1. Дослідження впливу фізичних характеристик ґрунту на співвідношення висоти зони розтягу до зони стиску при згині ґрунтової скиби	- 82
4.2. Порівняльний аналіз теоретичних досліджень	- 84
4.3. Порівняльний розрахунок техніко-економічних показників	- 85
4.4. Висновки до розділу	- 88
ВИСНОВКИ	- 89
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	- 91

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ, МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Аналіз існуючих видів глибокого розпушення ґрунту.

Розпушення (кришіння) ґрунту – розділення прошарку ґрунту, що обробляється, на окремі структурні частини (агрегати), яке супроводжується збільшенням відстаней між ними і, як наслідок, зменшенням об'ємної маси, (щільності) ґрунту [64].

За призначенням розпушення поділяється на три види: будівельне, меліоративне, сільськогосподарське.

Будівельне розпушення є підготовчим заходом і спрямоване на полегшення розробки ґрунту будівельними та дорожніми машинами [24, 57].

Меліоративне розпушення проводиться з метою підвищення ефективності використання меліоративних систем за рахунок впливу на коефіцієнт фільтрації ґрунту, умови водовідведення та водоакумулювання [66]. В комплексі меліоративних заходів проводиться глибоке меліоративне розпушення, зокрема, глибоке безвідвальне проорювання, поглиблення орного шару для покращення водопроникності шару ґрунтів потужністю не менше 0,6 м. Розпушення перезволожених ґрунтів застосовують на фоні закритого дренажу в комплексі з плануванням та іншими заходами по організації поверхневого стоку (обладнання водовідвідних колодязів у зниженнях рельєфу та ін.).

Сільськогосподарське розпушення, як основний вид обробітку, направлене на утворення оптимальної структури ґрунту для поліпшення умов збереження та нагромадження вологи, аерації й життєдіяльності мікроорганізмів у ґрунті [25, 26]. Поліпшений водний, повітряний та живильний режими ґрунту забезпечують інтенсивний ріст і розвиток кореневої системи рослин в глибоких шарах ґрунту, що у свою чергу стабілізує структуру за рахунок утворення в підорному шарі органічної речовини.

Заходи механічного обробітку ґрунту класифікуються за технологічним призначенням, за глибиною та способом обробітку (табл. 1.1).

Заходи сільськогосподарського механічного обробітку ґрунту

Класифікаційні категорії	Технологічні ознаки	Заходи
За технологічним призначенням		
Заходи основного обробітку	Найбільш глибокий обробіток, істотно змінює будову ґрунту	Оранка, чизелювання, плоскорізний обробіток
Заходи поверхневого обробітку	Для передпосівного та післяпосівного обробітку	Лущення, культивування, боронування, шлейфування, коткування, малування
Спеціальні заходи	Надання ґрунту особливих ознак у специфічних умовах	Щілювання, ланкування, підгортання, кротування*, боронування, гребенеутворення, оранка дисковими плугами*, ярусна оранка
За глибиною обробітку		
Поверхневий	до 8 см	Боронування, культивування, лущення, шлейфування, коткування
Мілкий	8-16 см	Лущення, плоскорізне розпушення, фрезерування*
Середній	16-24 см	Оранка, плоскорізне розпушення
Глибокий	понад 24 см	Оранка, чизелювання, щілювання*
Плантажний	40 см	Плантажна оранка*
За способами обробітку		
Полицевий	З обертанням оброблюваного шару	Оранка, лущення лемішними і дисковими луцильниками, фрезерування
Безполицевий	Без обертання оброблюваного шару	Плоскорізний обробіток, чизелювання, культивування, боронування, коткування

* - може бути також і меліоративним заходом.

У нашій країні і за рубежом намітилися дві основні тенденції у механізації розпушувальної обробки ґрунту [26, 44, 48, 49]: традиційна – із застосуванням відвальних плугів і ґрунтозберігаюча, яка включає дискування, фрезерування, кротування, щілювання, застосуванням різних безвідвальних знарядь, у тому числі плоскоріжучих, чизельних, а також комбінованих агрегатів.

Розрізняють наступні основні види відвального обробітку (оранки): культурна оранка, з оборотом шару, зі здійсненням шару, гладка оранка, ромбічна і ярусна. Відвальний обробіток відрізняється підвищеними енерговитратами і ґрунторуйнуванням, що знижує протиерозійну стійкість ґрунту, викликає необхідність використання пестицидів, які забруднюють навколишнє середовище [63]. На даний час проходить поступовий відхід від традиційної обробки,

який можна пояснити недостатньою її ефективністю по відношенню до ґрунтозбереження, енерговитрат та показників якості [15, 46]. Ґрунтозберігаючий обробіток, порівняно з традиційним, має менші енерговитрати, дає кращу ерозійну стійкість ґрунтів, але має, на даний час, недостатні якісні показники [34, 65]. До цього часу порядок критеріїв розробки робочих органів визначався як енерговитрати-якість, але інтенсифікація сільського господарства вимагає іншого порядку: якість-енерговитрати [12, 20, 52, 61]. Встановлено, що, обробіток ґрунту без обороту створює кращі умови для утворення гумусу та підтримання родючості ґрунтів [13].

На території Західної України переважають ґрунти глинисто-піщаного і супіщаного механічного складу [37, 43, 62] із переушільненими нижніми шарами (35...50 см – 1,90...2,00 г/см³). Шар гумусу в багатьох випадках становить лише 10-15 см верхнього шару [37, 43, 62], що говорить про недоцільність використання відвальних знарядь при відсутності інших вагомих причин, особливо при глибокій обробці.

Передумовою успішного вирішення поставлених задач є праці та дослідження багатьох відомих вчених. Вагомий вклад в розв'язання загальних питань землеробської механіки та обробітку ґрунту внесли: В.П.Горячкін, П.М.Василенко, Л.В.Погорілий, В.А.Сақун, В.І.Виноградов, Ю.О.Ветров, А.М.Зеленін, А.С.Кушнар'ов, В.С.Козаков, В.О.Дубровін, Д.Д.Прокопенко, І.А.Шевченко та ін. У дослідженнях вище зазначених вчених відображена низка суттєвих аспектів та висвітлені важливі закономірності процесу розпушення ґрунтів. При глибокому обробітку значної уваги заслуговує, ярусна схема робочих органів. Основні принципи та переваги такої схеми відображені в роботах С.В.Кравця, Є.Д.Томіна, В.І.Баловнева та інших. Нагальним залишається питання якісних показників розпушення ґрунту та їх залежності від форми та параметрів робочих органів, що відображено в працях таких вчених як: Я.С.Гукова, В.І.Корабельського, А.С.Павлоцького, В.І.Ветохіна, Б.А.Шелудченка, А.Н.Панченка, Б.А.Волика, В.Ф.Ткачука, О.П.Рижого. Однак, до цього часу залишається недослідженим ряд питань, багато з них дослі-

джені частково або потребують доопрацювання.

За багаторічними дослідженнями [59], при довготривалому використанні земель, внаслідок постійної оранки на глибину, багатократної дії ходових частин та осідання вимитих з верхнього розпушеного шару мулуватих частинок, ґрунт ущільнюється на глибину до 0,7-1,2 м, що має значний негативний вплив на верхні шари через створення низької водопроникності зв'язних ґрунтів. Разом з нерівномірністю рельєфу це призводить до того, що в надлишково- і середньовологі роки, навіть на дренажних площах, місцями довгостроково застоюються поверхневі води.

Тому, висловлюється багато тверджень про необхідність поглиблення орного шару до 0,4-0,6 м (в деяких випадках навіть до 1 м) [19, 42, 46, 53, 63]. Результати досліджень впливу глибокої обробки ґрунту на його агрофізичні властивості та на урожай сільськогосподарських культур [37] показують, що завдяки глибокій оранці ґрунтів значно покращуються їх фізичні та хімічні властивості. Внаслідок глибокої обробки у верхніх шарах збільшується кількість водомірних агрегатів, зменшується небезпека водної ерозії, зростає водопроникність в шарі 0...20 см [37]. В таких умовах у ньому зберігається тривалий період оптимальна його будова, параметри водного, повітряного і поживного режимів, формується розвинена коренева система рослин, здійснюється ефективний захист від бур'янів, хвороб і шкідників. При чому структурність ґрунту по глибині має бути різною [20], що вимагає керованості процесу структуроутворення робочим органом [38], що не властиво наявним робочим органам. Вертикальний ґрунтовий профіль має містити протиерозійний верхній шар (0-0,05 м) [37], оптимально структурований кореневмісний шар (0,05-0,40 м) та фільтраційний нижній шар (>0,4-0,6 м), що можливе при ярусності проведення розпушення [12, 38]. При такій глибині, ярусність також є бажаною і з умов зменшення енерговитрат.

Найбільш сприятливим періодом для об'ємного розпушення ґрунтів є осінь – період закінчення збирання сільськогосподарських культур і до глибоких заморозків. Розпушення ґрунту в цей період забезпечує більш повне аку-

мулювання осінньо-зимових і ранньовесняних опадів, меншу глибину промерзання та більш швидке відтавання ґрунту весною. Об'ємне розпушення можна проводити і весною перед висівом культури з подальшим ущільненням ґрунту. Весняне розпушення обмежене в часі 2-3 тижнями. Ефект від глибокого розпушення спостерігається на протязі 2-3 років [19].

Отже, на основі вище викладеного, впливає необхідність розробки безвідвального знаряддя для глибокого ярусного розпушення ґрунту з можливістю диференціації структури розпушеного ґрунту за глибиною обробітку.

1.2. Аналіз критеріїв оцінки якості розпушення

Стан, при якому ґрунт краще за все кришиться, його обробка вимагає мінімальних енергетичних затрат, називається сплістю. Глибоке розпушення проводять тоді, коли орний та підорний горизонти за всім профілем мають оптимальну вологість. При малій кількості вологи ґрунт не агрегується, при надто високих кількостях води утворення агрегатів припиняється і ґрунт при перемішуванні здобуває злитий стан.

Культурні рослини дуже чітко реагують на фізичні умови ґрунту: вони дуже швидко ростуть і розвиваються при оптимальній щільності та вологості і явно пригнічені при більш високій або низькій. За І.Б.Ревутом, відхилення щільності ґрунту на $100-300 \text{ кг/м}^3$ ($0,1-0,3 \text{ г/см}^3$) від оптимальної, призводить до зниження врожайності на 20-40% [55]. Інтервал оптимальної вологості вищий і ширший для важких і високогумусних ґрунтів, нижче і вужче для легких ґрунтів. В самих легких і важких ґрунтах це явище не проявляється зовсім. На початку інтервалу вологості структуроутворення отримуються більш дрібні агрегати, а в кінці цього інтервалу більш крупні.

Сукупність структурних агрегатів утворюють зерновий склад ґрунту. Зерновим складом ґрунту називають відносний вміст за масою частинок ґрунту різної величини, яка виражена в відсотках до загальної маси сухого ґрунту [14]. Важливість окремих фізичних властивостей в родючості ґрунтів, та, зокрема, його структурний склад, були зафіксовані в працях російських і україн-

ських вчених: Афоніна, Комова, А.А. Ізмаїльського, П.А.Костичева. Структурним складом ґрунту детально займався Н.А. Качинський.

За розмірами структурні агрегати розділяються на мікроструктурні (<0,25 мм), макроструктурні (0,25-10 мм) і мегаструктурні, або глинисті (>10 мм) [14, 37, 93, 102]. У відповідності з ОСТ 70.2.15-73 структурні агрегати за розмірами поділяються на декілька типів: глибиста структура – агрегати розміром >10 мм; комковата – 10...3 мм; зерниста – 3...0,25 мм.

В переважній більшості сучасних робіт нижньою границею макроагрегатів рахуються утворення, які мають розмір 0,25 мм і більше в діаметрі. Що стосується верхньої межі розмірів ґрунтових макроагрегатів, то вона має в певній мірі умовний характер і носить явно виражений зонально-географічний характер. Для умов засушливої зони, достатньо точно встановлено, що кращими властивостями володіють агрегати від 0,5 до 2...3 мм. В більшості робіт прийнято вважати оптимальними розміри агрегатів від 0,25 до 5-7 мм, а в деяких випадках 3-10 мм в діаметрі [57, 66] – для кореневмісного шару, 0,25-20 мм в верхньому шарі.

Оптимальні нормативні параметри обробленого ґрунтового шару для агрокультур визначаються агротехнічними вимогами [63]. Узагальнені показники яких є наступні:

- структура ґрунту для посіву повинна бути дрібнокомковатою з перевагою грудок діаметром 1(3)...10 мм;
- вміст грудок розміром 1...25 мм – не менше 80%;
- вміст грудок розміром до 5 мм – не менше 75%;
- вміст грудок розміром до 50 мм – 70-90%;
- склад верхнього шару (0-5 см) з агрегатів 10-20 мм, вміст агрегатів >1 мм >50% [32, 55], агрегати розміром менше 1 мм вважаються ерозійно небезпечними.[55];
- щільність поверхневого шару – 1,2-1,3 г/см³ (для попередження непродуктивного випаровування вологи);
- щільність верхніх кореневмісних шарів над насінням 0,9...1,0 г/см³;

- щільність кореневмісних шарів $1,2 \text{ г/см}^3$;
- щільність ґрунту нижче насінного ложа до $1,1 \dots 1,3 \text{ г/см}^3$;
- об'єм повітряних пор (шпаруватість, пористість) 70%;
- висота гребенів на поверхні поля до 3...4 см;
- твердість ґрунту – до 30 кг/см^2 ;
- водопроникність – понад 30 мм/год;
- коефіцієнт фільтрації повинен складати 5...10 л/добу;
- тиск рушіїв на ґрунт нормується ГОСТ 26955-86 [32];
- питома енергоємність процесу - до 33-35 кВт/м ширини захвату [25].

Показники сучасних ґрунтообробних знарядь відповідають нормативним в основному лише при невеликій глибині оранки (0-20) см [38].

Ступінь відповідності стану ґрунту агротехнічним вимогам характеризують декількома критеріями: коефіцієнтами розпушення, структурності, повноти розпушення, різнозернистості та ступенем здрібнювання.

За А.Н.Зеленіним розпушуваність – властивість ґрунту, що розробляється, збільшуватись в об'ємі при постійній його масі, характеризується коефіцієнтом розпушення k_p , який визначається відношенням об'єму розпушеного ґрунту до об'єму, який він займав в природному заляганні. Середні значення k_p лежать в межах 1,08-1,35, а коефіцієнт остаточного розпушення в межах 1,01-1,09 [56]. Менші значення відповідають піщаним ґрунтам, більші – глинистим. З плином часу розрихлений ґрунт “злежується”, ущільнюється і зберігає тільки остаточну розпушеність.

Повнота розпушення характеризується коефіцієнтом повноти розпушення k_n , який показує об'єм розпушеного ґрунту по перерізу проходження робочих органів розпушувача [62] з врахуванням площі перерізу розпушеного ґрунту та площі перерізу нерозпушеного ґрунту на смузї захвату.

Коефіцієнти k_p та k_n не відображають величини утворюваних структурних ґрунтових агрегатів, що є їх суттєвим недоліком.

Для кількісної оцінки якості структури ґрунту користуються характеристикою структурного складу ґрунту [67], якою є коефіцієнт структурності k_c :

відношення кількості макроагрегатів розміром 0,25...7 мм (C) до суми кількості макроагрегатів $<0,25$ мм і >7 мм (B). Чим більше k_c тим кращою є структура ґрунту. Але оцінка ґрунту буде неадекватною при наявності значних великих ґрунтових скиб, так, як коефіцієнт структурності не враховує співвідношення кількості і розмірів ґрунтових агрегатів.

Нова методика оцінки структурності ґрунту була запропонована кафедрою сільськогосподарських машин Дніпропетровського державного аграрного університету (ДДАУ) [34]. Протягом останніх років в ході модельних досліджень кришіння запропонована методика оцінки якості обробки ґрунту за ступенем здрібнювання та коефіцієнтом різнозернистості.

Ступінь здрібнювання ґрунту (i) характеризує розміри агрегатів, які утворюються після проходу агрегату і являє собою відношення і середньостатистичний розмір структурних агрегатів до (D_n) і після обробки (D_k). При цьому, D_n являє собою умовний теоретичний показник, який залежить від глибини обробітку ґрунту, ширини захоплення, приведеного коефіцієнта довжини шару, що залежить від довжини лінії відколу шару. Для відомих знарядь для основної обробки ґрунту і глибин $0,2 < a < 0,4$ можна прийняти $K_L = 1$ м [62].

Ступінь здрібнювання i для отримання структурних агрегатів 2...10 мм повинен становити 200...2000.

Коефіцієнт різнозернистості структурних агрегатів (K_p) характеризує розкид розмірів агрегатів і визначається як відношення середніх діаметрів агрегатів, що складають 60% (D_{60}) та 10% (D_{10}) маси ґрунтового об'єму.

Теоретично оптимальне значення $K_p \rightarrow 1$ при $2 < D_{60} < 10$ мм, У реальних умовах бажаним значенням буде $K_p = 9...16$, хоча прийнятним значенням варто вважати значення $K_p = 10...70$. Збільшення значення K_p свідчить про одночасний ріст у розпушеному шарі загальної кількості структурних агрегатів малого і великого діаметрів, тобто агрегатний склад стає більш неоднорідним.

Показники структурності i та K_p визначаються методом електронного сканування зображення чи поверхні ґрунтового зрізу з наступною їхньою обробкою на ЕОМ. Після проходу ґрунтообробного агрегату в оброблений ґрун-

товий профіль упроваджують металеву рамку 1 (рис. 1.1.) таким чином, щоб рівень денної поверхні 2 був у межах скляного вікна 3 і з однієї сторони розкривають дно борозни. Позитивним є те, що при цьому структура профілю не порушується, і обумовлені показники найбільш об'єктивно відбивають стан ґрунту.

За даною методикою оцінки якості розпушення, нинішні основні сільськогосподарські знаряддя не забезпечують (при однократній дії) необхідної якості розпушення ґрунту (табл. 1.1).

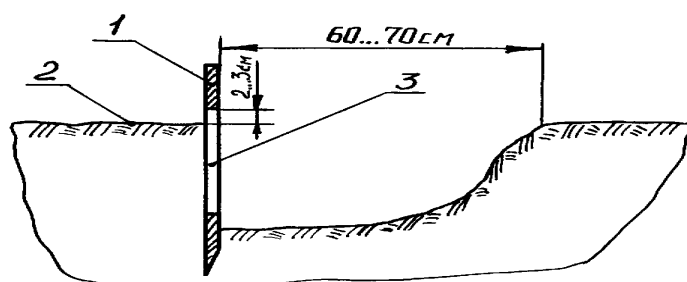


Рис. 1.1. Схема підготовки ґрунтового профілю до сканування.

Таблиця 1.1

Ступінь подрібнення ґрунту для сільськогосподарських знарядь

Тип знаряддя	Реальна ступінь, i	Необхідна ступінь, i_n
Борона зубова БДТ-1,0	3,5...4,0	9
Борона дискова БДН-3,0	4,0...12,0	32
Культиватор КПС-4	2,6...3,0	64
Плуг ПЛН-6-35	2,6...2,8	46
Плуг ПН-4-35	2,65	45
Плуг-чизель ПРН-3100	18,0	50
Плуг-чизель ПФМ-2,1	50...90	65
Плоскоріз-глибокорозпушувач КПГ-2,1	2,0...2,5	65

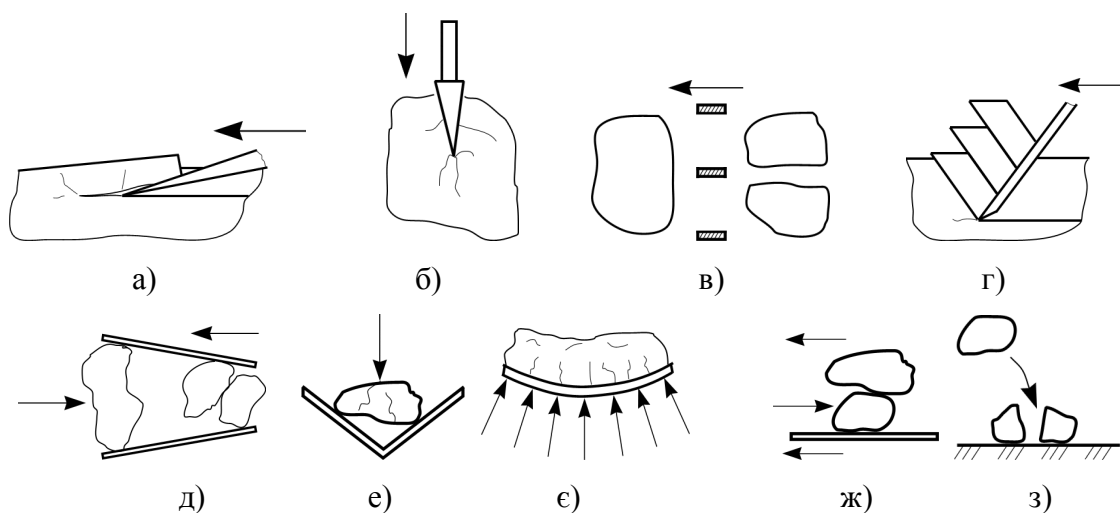
Показники оцінки якості розпушення ДДАУ є найбільш повніше відображають стан ґрунту, але також мають деякі недоліки. За даними показниками якість обробки ґрунту різними знаряддями значно різниться, що не зовсім відповідає дійсності. Дані показники більше характеризують ефективність ґрунтообробного органу ніж стану ґрунту.

1.3. Обґрунтування раціонального способу подрібнення ґрунту

1.3.1. В робочих органах машин запроектоване використання декількох видів

подрібнення ґрунту: відрив, розкол, сепарація, скол, роздавлювання, злам, згин, зсув, гравітаційний удар (рис. 1.2.). Кожен вид подрібнення дає різну ефективність. Згідно експериментальних даних д.т.н., проф. А.М. Панченка найефективнішим, за методикою ДДАУ, є руйнування ґрунту в вертикальній площині.

Відрив – здійснюється горизонтальними та вертикальними ріжучими кромками з малим кутом різання, первинне руйнування ґрунту по один бік ріжучої кромки. Призводить до утворення великих макрокусків в повздовжній площині (відносно руху робочого органу). Значно залежить від характеристик ґрунтового середовища та параметрів робочого органу.



а) – відрив; б) – розкол; в) – сепарація; г) – скол; д) – роздавлювання; е) – злам; е) – згин; ж) – зсув; з) – гравітаційний удар.

Рис. 1.2. Основні способи подрібнення ґрунту

Розкол – характерне для двосторонніх ріжучих елементів, первинне руйнування ґрунту по обидва боки робочого елемента з деяким його ущільненням. Проходить в основному в вертикальній площині. Призводить до утворення середніх макрокусків. Значно залежить від характеристик ґрунтового середовища.

Сепарація – первинне подрібнення ґрунту за рахунок просторового розташування робочих елементів. Характерне для багатоелементних та багатоярусних робочих органів. Призводить до утворення крупних та середніх кусків, розміри яких задають параметри робочого органу і слабо залежать від харак-

теристик ґрунтового середовища.

Скол – первинне розділення ґрунту в вертикальній площині. Здійснюється ріжучою кромкою при більших, ніж для відриву, кутах різання. Призводить до утворення великих макрокусків в повздовжній площині (відносно руху робочого органу). Значно залежить від характеристик ґрунтового середовища та робочого органу.

Роздавлювання – вторинне подрібнення ґрунту за рахунок стиску скиби ґрунту при двосторонньому прикладенні зусилля. Призводить до утворення середніх та дрібних кусків. Значно залежить від характеристик ґрунтового середовища.

Злам – вторинне подрібнення ґрунту за рахунок однократного руйнування між гранями робочого органу, які встановлені під кутом одна відносно одної. Призводить до утворення середніх кусків. Слабо залежить від характеристик ґрунтового середовища та значно від параметрів робочого органу.

Згин – вторинне подрібнення ґрунту за рахунок багатократного зламу при копіюванні скибою криволінійної форми поверхні робочого органу. Призводить до утворення середніх та дрібних кусків. Слабо залежить від характеристик ґрунтового середовища та значно від параметрів робочого органу.

Зсув – вторинне подрібнення ґрунту за рахунок сил тертя між ґрунтових агрегатів по поверхні робочих елементів та між собою. Призводить до утворення дрібних і пилюватих кусків. Значно залежить від характеристик ґрунтового середовища.

Гравітаційний удар – остаточне подрібнення ґрунту при падінні з висоти кінцевого перерізу робочого елемента за рахунок перевищення ґрунтовим агрегатом граничних внутрішніх напружень. Призводить до утворення середніх та дрібних кусків. Значно залежить від характеристик ґрунтового середовища, не залежить від форми робочого елемента.

Згідно сказаного, при проведенні розпушення ґрунту необхідно мати вплив на керованість процесу подрібнення. З цієї точки зору пріоритетними можна вважаються способи, які є більш залежними від параметрів робочого

органу ніж від характеристик ґрунтового середовища, тобто: сепарацію, злам, згин.

З точки зору енергоємності небажаними є способи в яких присутніми є притискання, затискання чи ущільнення, це – розкол, роздавлювання, зсув.

Зважаючи на величину отримуваних ґрунтових агрегатів, для отримання середньо- та дрібнокомковатої структури (п. 1.2.) необхідно використовувати злам, згин та гравітаційний удар.

Найменш енергоємною деформацією ґрунту є розрив [55]. Застосування у ґрунтообробних органах прямого розриву ґрунту є досить проблематичним внаслідок неможливості чіткої фіксації кінців агрегату, який розтягується, що негативно впливає на можливість керування процесом в часі. Так, як ґрунтове середовище чинить різний опір деформаціям розтягу та стиску, то альтернативним варіантом виступає згин. Так, як відношення модулів пружності на стиск та розтяг – $E_c/E_p=2,5...4,1$ [36], то при згині ґрунтового шару до 62-83% ґрунту в поперечному перерізі працює на розтяг.

Використання згину дозволить реалізувати ефект Баушингера [28], дії на ґрунт різнонаправлених деформацій, чим може бути досягнута значна економія енергії.

Отже, для можливості диференціації структурування ґрунту з мінімальними енерговитратами в робочих органах розпушувачів необхідно орієнтуватися на створення умов згину ґрунтового шару.

1.3.2. Відомі методики, коли при подрібненні ґрунту розглядається величина енергії стиску, яку необхідно надати ґрунтовому середовищу (Рітінгер, Кирпичев, Кік). Вони передбачають поступове подрібнення ґрунтового середовища на частинки однакової форми, розміри яких залежать від кількості енергії, яка була надана. Використання таких теорій вимагає введення багатьох поправочних коефіцієнтів для врахування показників зміни ґрунтових умов і не дає змоги реально передбачити результат подрібнення ґрунту у структурному вигляді, де завжди є в наявності ґрунтові частинки різної форми та розмірів. Крім того, для моделювання розглядається ґрунтовий об'єм кубічної форми,

що не відповідає формі ґрунтових скиб, які утворюються при роботі ґрунтообробних знарядь.

З врахуванням співвідношення габаритних розмірів ґрунтової скиби колективом ДДАУ [33, 35] було розглянуто поширення тріщин в ґрунтовому об'ємі в залежності від способу розміщення ґрунтових частинок різної форми та сил зчеплення між ними при фронтальній дії ґрунтообробних знарядь. Це передбачає використання в основному деформацій стиску, що призводить до певного ущільнення частинок ґрунту і не дає змогу максимально знизити енергоємність розпушення.

Відомі дослідження де розглядається подрібнення ґрунтової скиби згином за умови досягнення граничних деформацій 95% її матеріальних волокон на робочих органах увігнуто-випуклої форми [40]. Ступінь подрібнення, при цьому, залежить від кількості гранично-деформованих волокон по висоті перерізу скиби. Дослідження проводилися для ґрунтових скиб малих розмірів без розгляду механізму утворення дрібніших ґрунтоагрегатів з більших.

Процес розпушення ґрунту згином із наявністю стиску та засіб для його здійснення був розглянутий Рижим О.П.. Ним розглянуто напружено-деформований стан ґрунтових скиб, які утворюються сколом на лемеші робочого органа жолобоподібної увігнутої форми і теоретично визначено величину радіуса початку руйнування ґрунтової скиби (0,3-0,4 м). Також зазначено, що ступінь подрібнення ґрунту залежить від величини радіуса кривизни горизонтальних волокон скиби. Недостатньо уваги приділено механізму подрібнення, через його ускладненість зонами стиску, що не дало змогу теоретично визначити граничний радіус згину скиби і в повній мірі оцінити його вплив на макроструктуру розпушеного ґрунту. Радіус було визначено експериментально для певних ґрунтових умов.

1.4. Визначення напрямків покращення ефективності розпушення ґрунту існуючими робочими органами

В сільському господарстві та в меліоративному комплексі для підготов-

ки земляних площ, в залежності від природних та ґрунтових умов, використовуються різного типу глибокорозпушувачі. Приведемо їх класифікацію.

Глибокорозпушувачі класифікуються:

- за призначенням: будівельні, меліоративні, сільськогосподарські;

- за принципом дії:

активні: ударні: вібраційні, частотні, електрогідрравлічні;
фрезерні: барові (ланцюгові), роторні;
дискові;

пасивні: дискові, ножові (зубові), полицеві.

інтенсифіковані: з використанням фізичних ефектів;

з використанням хімічних ефектів;

з використанням електро-хімічних ефектів;

- за агрегатуванням: навісні, напівнавісні, причіпні;

- за площинністю дії: багатоплощинні;

одноплощинні: вертикальна площина,
горизонтальна площина;

- за компонованням: рядні, ярусні, комбіновані;

- за кількістю робочих елементів: 1-, 2-, багатоелементні;

- за видом робочого елемента: S-, T-, U-, V-подібні, долото-, скобо-, жолобовидні, ножові (зубові), відвальні, стрільчаті.

Вітчизняні та зарубіжні виробники сільськогосподарських розпушувачів і їх технічні показники наведені в дод. В та дод. Г, відповідно.

На даний час основними знаряддями в сільському господарстві для основної обробки ґрунту є полицеві робочі органи. До них відносяться різного типу плуги. Відвальні корпуси плугів за формою робочої поверхні підрозділяються на культурні, напівгвинтові і гвинтові. Культурні добре обертають і кришать ґрунтовий шар, тому їх використовують для оранки староорних ґрунтів; напівгвинтові і гвинтові добре обертають шар, але погано кришать його – з їх допомогою зорюють сильнозадернілі, цілинні і перелогові землі. Обґрунтування параметрів відвальних поверхонь [53, 55, 64] направлені в основному

на зменшення енергоємності розробки ґрунту та повороту ґрунтового шару з умови невідривного руху поверхнею. Недоліками цих машин є: велика питома маса, складність конструкції і велика енергоємність.

На даний час в ґрунтозахисній та вологозберігаючій технологіях обробці ґрунту широко використовуються робочі органи з плоскими формами робочих поверхонь. Головним їх недоліком є низька здатність якісно розпушувати вирізаний пласт, підвищені енергетичні показники технологічного процесу, а також небезпека зруйнувати біологічно активну структуру ґрунту [68].

ґрунтообробні робочі органи з криволінійними формами робочих поверхонь в значній мірі можуть усунути ці недоліки. Це пов'язано з тим, що такі поверхні мають змінні кути деформації і рух ґрунту такими поверхнями проходить з перемінною швидкістю. Як свідчать різнопланові дослідження форм поверхонь та їх профілів [18, 54, 60, 61], зокрема дослідження Павлова А.В., Корабельського В.И., Павлоцького А.С. Ветохіна В.І., Кравчука В.І. [31, 68], криволінійні форми робочих поверхонь спроможні розпушувати ґрунт з малими енерговитратами.

Існує думка, що ґрунт на робочій поверхні криволінійної форми рухається із змінною швидкістю. При цьому окремі шари ґрунтової маси взаємодіють між собою, отже і переміщуються по різному. Це і спричинює ефективну дію механізму деформації ґрунту та інтенсивне руйнування внутрішніх зв'язків у ньому [68, 95, 110]. Згідно цього, відвальні поверхні плугів, які забезпечують різні кутові швидкості обертання точок ґрунтового шару, краще його кришать за рахунок зміщення вертикальних перерізів ґрунтового шару один відносно одного.

Це твердження говорить про вплив форми та радіуса кривизни r відвальної поверхні на ступінь кришіння ґрунту.

Хоча цим умовам, в певній мірі, відповідають культурні відвальні поверхні плугів, але вони не можуть бути визнані за раціональні кришилльні поверхні тому, що розроблялися тільки з умови забезпечення малоенергоємного перевороту ґрунтового шару. Нераціональність відвальних поверхонь плугів як

розпушувальних підтверджують дослідження Оренбурзького СГІ, де проводили аналіз різних форм робочих поверхонь російських та зарубіжних плужних корпусів, зокрема ПЛЕ-21 та американської фірми “John deere”. На основі теорії технологічного процесу оранки акад. В.А. Желіговського, був зроблений висновок, що всі процеси пов’язані з кришінням ґрунту проходять в першій частині робочої поверхні, до переходу на крило відвалу. За результатами експериментальних випробувань вкорочені відвали кришать ґрунт гірше ніж стандартні лише на 5-7% [38].

Казакевичем П.П. для симетричної відвальної поверхні плуга було обґрунтовано форму направляючих кривих, знайдені раціональні форми їх ортогональних перерізів виходячи з рівнянь плоскопаралельного руху поперечного перерізу шару [61]. Його аналіз показує, що форма направляючої залежить від параметрів корпусу, ширини захвату b і швидкості, і найбільш прийнятними слід вважати виконання направляючої кривої в вигляді параболи або спряжених дуг.

Недоліком є те, що рух ґрунту по криволінійній направляючій може бути утрудненим через утворення ґрунтових ущільнень у впадинах цієї кривої.

Павлов А.В., Корабельський В.І., Павлоцький А.С. [54], для зменшення енерговитрат, пропонують S -подібний повздовжній профіль, а поверхню виконувати зі знакоперемінною кривизною. Ці принципи були застосовані в конструкціях пристроїв типу скоби та напівскоби, а також чизельного плуга, розробленими ГСКБ “Одесаґрунтмаш”, і успішно використовуються в технологіях глибокого розпушення [67].

Ґрунтодеформуючі поверхні знакоперемінної дії сприяють зниженню тягового опору робочих органів до 20%, підвищують ефективність кришіння (при збереженні біологічно активної структури ґрунту) і забезпечують активне перемішування внутрішніх шарів, що подовжує час дії розпушення і підвищує вологоакумулюючу здатність. Недоліком є те, що внаслідок S -подібності повздовжнього профілю, з вгнутою частиною на початку, виникає ущільнення ґрунтового шару в напрямку руху. Раціональність даної форми повздовжнього

профілю поверхні обґрунтована з умов енерговитрат [28, 29].

Коллективом авторів НУВГП, зокрема, Рижим О.П., розроблений варіант ґрунторозпушувальної поверхні з умов структуроутворення. Запропонована поверхня (рис. 1.3.) є сукупністю прямих твірних L_t , які сполучають відповідні точки (точки M та N) на відрізку $[-b; b]$ та кінцевій дузі радіусом R без врахування умов переходу і зміни форми поперечного перерізу між ними. При цьому довжина дуги дорівнює довжині відрізка $[-b; b]$.

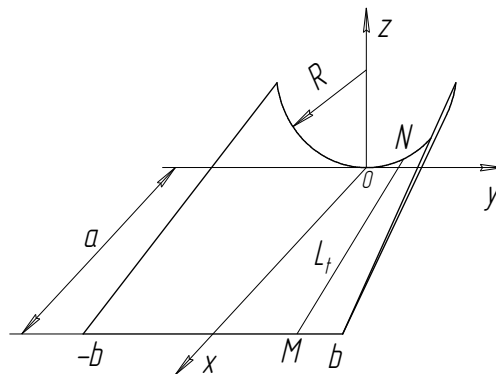


Рис. 1.3. Схема ґрунтообробної поверхні

Зменшуючи або збільшуючи радіус кривизни на виході з транспортувальної поверхні, можна регулювати ступінь розпушення ґрунту. Лінійчастість поверхні зменшує ймовірність залипання поверхні ґрунтом.

Але, як показав графоаналітичний аналіз цієї поверхні, вона має суттєві недоліки. Вона є нерозгортною, в ній присутній горизонтальний поперечний стиск ґрунту. Це відбувається внаслідок того, що поточним поперечним перерізом поверхні є еліпс, більша піввісь якого лежить в площині симетрії. При чому, найбільший стиск скиби спостерігається на середній частині поверхні, тому кінцева частина є більше пасивно транспортуючою ніж робочою, що майже вдвічі зменшує ефективність використання деформувальних властивостей поверхні та веде до перевитрати матеріалів і надлишкової поверхні тертя.

Крім того, невідповідність та неузгодженість співвідношення геометричних параметрів та форми поверхні до процесу згину ґрунтової скиби, неврахування умов переходу між крайніми перерізами, а саме наявності еліптичних поперечних перерізів в середині поверхні, призводить до значних деформацій

стиску та нерівномірності інтенсивності розпушення ґрунту. Форма і параметри поверхні не змінювані за глибиною обробітку, що не відповідає необхідності диференціації ступеня розпушення ґрунту в ярусах при глибокому розпушенні. Значна частина деформацій на таких поверхнях проходить у повздовжній горизонтальній площині замість вертикальної, що спричинює до утворення зон ущільнення ґрунту.

Патентний огляд вибору раціональної форми поверхні та її повздовжнього профілю засвідчив наявність різноманітних форм ґрунтообробних елементів: гіперболічний параболоїд [6], гвинтова [2, 5, 11], прямий та еліптичний, вгнутий та випуклий конуси [1, 11, 21, 22], циліндрична, [8] і їх комбінації [1, 3, 8, 10, 11]. При чому як бачимо всі форми добре відомі.

Зважаючи на різноманітність форм поверхні робимо висновок про необхідність оптимізації форми криволінійної поверхні ґрунтообробного елемента з умов отримання заданої структурності ґрунту.

1.5. Висновки до розділу

На основі проведеного аналізу були зроблені наступні висновки:

- глибоке розпушення ґрунту повинно проводитись пошарово з можливістю диференціації структури ґрунту за глибиною обробітку;
- наявні конструкції робочих органів розпушувачів не в повній мірі відповідають диференційованим за глибиною обробітку агротехнічним вимогам до глибокого розпушення;
- для підвищення ефективності робочого процесу розпушування слід використовувати згин ґрунтової скиби;
- форми поверхонь наявних розпушувачів не враховують різних ґрунтових умов в орному і підорних шарах. Необхідно обґрунтувати параметри ґрунторозпушувальних поверхонь розпушувачів на основі фізико-механічних характеристик ґрунту;
- необхідним є створення нової, адаптованої до ґрунтових умов, конструкції глибокорозпушувача керуючись наступними принципами:

- ✓ ярусна конструкція робочого органа глибокорозпушувача;
- ✓ забезпечення диференціації ступеня розпушення по глибині обробітку;
- ✓ обробіток ґрунту на докритичних глибинах;
- ✓ врахування зміни властивостей ґрунту за глибиною обробітку в параметрах ґрунторозпушувальних поверхонь та всього робочого органа в цілому;
- ✓ використання малоенергоємних способів деформування ґрунту.

Метою роботи є підвищення ефективності глибокого розпушення ґрунту на основі створення нового ярусного робочого органа глибокорозпушувача з обґрунтуванням його конструктивно-технологічних параметрів на підставі врахування фізико-механічних характеристик ґрунту в орному та підорних шарах.

Для досягнення поставленої мети вирішенню підлягали наступні задачі досліджень: проаналізувати чинні способи і засоби глибокого розпушення перезволожених та ущільнених ґрунтів, з'ясувати недоліки та обґрунтувати напрями їх усунення; теоретично й експериментально обґрунтувати форму та параметри ґрунторозпушувальних поверхонь ярусного глибокорозпушувача, а також їх просторове розміщення в напрямку руху машини з врахуванням різних ґрунтових умов в орному та підорних шарах; дослідити експериментально вплив фізико-механічних показників ґрунтів та конструктивних параметрів ґрунторозпушувальних поверхонь на якість розпушення ґрунту; розробити інженерну методичку проектування та розрахунку ярусних глибокорозпушувачів; виготовити та провести випробування зразка запропонованого глибокорозпушувача, оцінити ефективність його роботи.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОЧОГО ОРГАНА ЯРУСНОГО ГЛИБОКОРОЗПУШУВАЧА

2.1. Теоретичні передумови до обґрунтування ґрунторозпушувальної поверхні

2.1.1. Обґрунтування моделі ґрунтового середовища

Врахувати всі процеси, які протікають в ґрунті при розпушенні, практично неможливо, тому необхідно обмежитися невеликою кількістю показників стану ґрунту, які достатньо повно характеризують його стан.

Взаємодію робочого органа з ґрунтом зводять переважно до взаємодії твердого недеформованого тіла з трьохфазним середовищем: твердим, рідким і газоподібним [40]. Мінеральні частинки вважаються твердою фазою.

При взаємодії ґрунту з робочими органами проявляються пружні, в'язкі та пластичні властивості [57]. Пріоритет виду властивостей залежить від швидкості навантаження та часу релаксації ($t_{rel} \approx 0,17-0,18$ с). Реологічні дослідження ґрунтів проводили П.М.Василенко, А.С.Кушнар'ов, Д.Д.Прокопенко, Питання моделювання напруженого стану розглянуті в роботах А.Г.Назарова, Г.І.Покровського, Г.Н.Кузнєцова, різання ґрунту в роботах А.Н.Зеленіна, В.І.Баловнева, А.В.Гусева, В.Г.Волобоева, зарубіжних вчених: Г.Мерфі, Д.Шурінг. В залежності від співвідношення пружних, в'язких та пластичних властивостей при малих швидкостях деформації різні ґрунти ведуть себе по різному. Вважається, що при одноразовому та короткочасному навантаженні ґрунти різного стану можуть вести себе однаково.

В залежності від умов навантаження ґрунтове середовище розглядають як пружно-пластичне [31], сипуче [20], в'язко-пружне [58], в'язко-пластичне [47], пластичне та майже суцільне середовище, систему зв'язаних частинок [31]. Пружний, в'язко-пружний, пастичний стан ґрунту розглядали

Я.Г.Цимбал, В.І.Виноградов, А.С.Кушнар'ов, I.V.Perumpral, I.B.Zielendahl, W.H.Perloff, I.Joshida, G.E.Coleman, R.N.Vond, E.A.Fattah, O.Kitani, M.Ichikawa, T.Isa [17].

Різні моделі ґрунту можна звести до одної найбільш розповсюджені моделі суцільного середовища. Основною перевагою при цьому є можливість розгляду напружень і деформацій нескінченно малих елементів об'єму тіла з переходом до напружено-деформованого стану всього тіла.

Багато відомих вчених, зокрема таких як: В.П.Горячкін [41], Г.Н.Синеоков [11], А.С.Кушнар'ов та ін, вважають що ґрунт відноситься до складного, але звичайного фізичного тіла, якому властиві закони деформації ідеального тіла.

При обробці об'єму ґрунту розміри якого в усіх напрямках перевищують 50 мм, його можна моделювати як суцільне квазіоднофазне середовище [65]. В цих же умовах, прийнятною є модель ґрунту, яка зведена до тіла Шведова-Бінгама, за якою поведінка ґрунту, під дією на нього робочого органу, до руйнування макроструктури, представляється як пружна, потім як пружно-в'язко-пластична, до досягнення границі пластичності, а після границі пластичності – як пластична [13].

При розгляді відриву блока ґрунту, що сколюється, в основному модель ґрунту представляють у вигляді суцільного пружного середовища (Е.Д.Афонін). Така ж схема розглядається при згині та крученні консольної балки Ю.В.Луканіним.

Відомі твердження що, дослідження згину ґрунтової скиби, можна розглядати як згин ґрунтової балки з використанням положень опору матеріалів [54]. При цьому необхідно врахувати двомірність ґрунтового середовища та циклічний характер подрібнення ґрунту [20], з поступовим руйнуванням більших агрегатів призматичної форми [40] на менші.

В теорії руйнування ґрунтів найбільш важливим питанням є встановлення залежності напружень від деформації.

При згині ґрунтового шару у верхніх шарах виникають напруження сти-

ску, а в нижніх – розтягу, при чому, внаслідок різного опору ґрунту деформаціям розтягу і стиску, ґрунтовий об'єм з напруженнями розтягу переважає і може становити до 82% всього об'єму [36]. Руйнуючі напруження розтягу є значно меншими відносно руйнуючих напружень стиску, зсуву чи згину, а за даними Д.І.Золотаревської, при малих значеннях напружень, вони (напруження) є приблизно пропорційними деформаціям [58].

З іншої сторони для ґрунтів широко використовується степенева залежність напружень та деформацій [58]:

$$\sigma = c \cdot \varepsilon^\mu;$$

де c , μ – емпіричні коефіцієнти, при чому для розпушених ґрунтів $\mu > 1$, для щільних $\mu < 1$, звідки можна зробити припущення, що для ґрунтів середньої щільності $\mu \rightarrow 1$, що призведе до пропорційного виду наведеної залежності $\sigma(\varepsilon)$.

З в'язкопружної моделі Кельвіна [58]:

$$\sigma = E\varepsilon + \mu \frac{d\varepsilon}{dt};$$

де t – час; E – модуль пружності середовища; μ – коефіцієнт в'язкості.

Залежність $\sigma(\varepsilon)$ є пропорційною при сталій швидкості деформації ($d\varepsilon/dt = const$).

Згідно наведених тверджень, при постійній швидкості деформації ґрунту, залежність напружень та деформації є пропорційною.

В вузькому діапазоні зміни швидкості деформації, її вплив на напруження руйнування розривом можна виразити лінійною залежністю $\sigma = \sigma_0(1 + K_{rel}V_d)$ [140] (K_{rel} – коефіцієнт, який враховує релаксаційні властивості ґрунту, $K_{rel} = 0,25$ [140]; σ_0 – напруження в ґрунті від дії руйнуючих зусиль за 1 с).

При розпушенні ґрунту потрібно скоректувати лише його макроструктуру без руйнування структурних ґрунтоагрегатів, тому розробка потенційно малоенергоємного глибокорозпушувача повинна базуватися на основі пружних властивостей ґрунту з пропорційною залежністю між напруженнями та деформацією розтягу. При цьому необхідною умовою є сталість швидкості деформації розтягу нижніх волокон ґрунтової скиби при її згині. Ґрунтова скиба розглядається як однорідне за щільністю, суцільне середовище утворене

сукупністю окремих структурних агрегатів зв'язаних між собою силами зчеплення [13].

В якості теорії міцності, на основі попередніх досліджень [56, 57], прийнята до уваги теорія міцності Кулона-Мора, як для середовища, що чинить різний опір деформаціям розтягу та стиску.

На цій основі проводиться визначення необхідної для подальших розрахунків величини відношення товщини зони розтягу до товщини зони стиску при згині, $k_h = h_p/h_c \approx \sigma_c/\sigma_p$. За попередніми даними співвідношення σ_c/σ_p є функцією внутрішнього тертя ґрунту.

2.1.2. Дослідження геометрії та кінематики руху точок ґрунтової скиби при поперечному згині

Ефективність роботи ґрунторозпушувальної поверхні визначається її параметрами. Для визначення критеріїв оптимізації параметрів поверхні необхідно визначитися з формою її поперечного перерізу та оцінити характер фронтальних проекцій просторових траєкторій точок ґрунтового скиби, при поперечному згині. Дослідження геометрії та кінематики руху точок необхідне для визначення раціональних кінематичних режимів поперечного згину ґрунтової скиби.

При русі ґрунторозпушувальною поверхнею скиба ґрунту в поточному поперечному перерізі деформується згином. Для забезпечення однакового ступеня деформації розриву по всій ширині скиби її умовні волокна при згині повинні утворювати дуги кіл. Для зрівноважування бокового зусилля згин мусить бути симетричним.

Згин ґрунтового шару розглядаємо за деформацією розтягу його нижніх волокон (рис. 2.1.) (до 82% об'єму). Систему координат орієнтуємо наступним чином. Початок координат розмістимо на середині лемішної прямої, вісь Ox направляємо по перетину площини симетрії з поверхнею, вертикально вгору – Oz , вправо – Oy . В подальших дослідженнях будемо розглядати поверхню та переріз від площини симетрії до краю в додатному напрямку поперечної осі Oy

просторової системи координат.

Розглянемо траєкторію руху деякої точки $M(z_M, y_M)$, яка лежить на краю нижніх волокон ґрунтової скиби.

При згині ґрунтові волокна утворюють дуги $\cup(OM)_i = \cup l$ з центром кривизни в т. O_2 , радіусом $R_i \in (\infty; R_k]$, $i=1, 2, 3, \dots$. Де R_k – кінцевий радіус поперечної кривизни поверхні, визначається фізико-механічними властивостями ґрунтів та агротехнічними вимогами; l – довжина дуги $\cup(OM)_i$, максимальне значення визначається з умови неперевертання ґрунтового шару при згині, $l \in [l_n; l_n(\varepsilon_p+1)]$, де l_n – довжина дуги нейтральної лінії, $l_n \in (0; R_k\pi/2]$; ε_p – гранична величина подовження нижніх волокон.

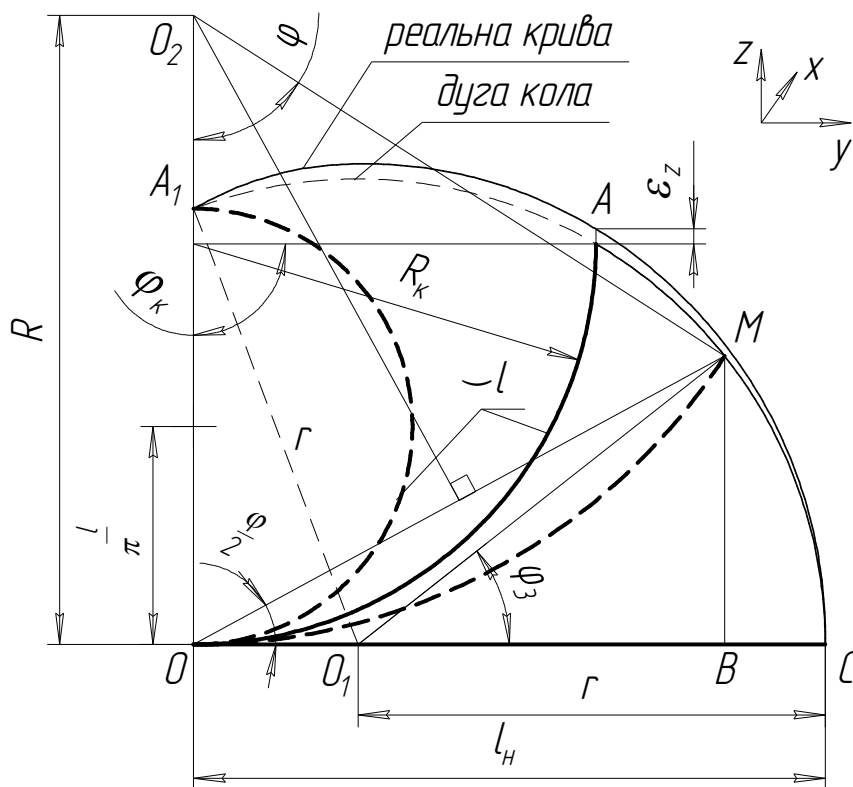


Рис. 2.1. Основні геометричні параметри поперечного перерізу

Центральний кут дуги l :

$$\varphi = l/R; \quad (2.1)$$

при $R=R_k$ $\varphi=\varphi_k$, тоді φ_k – центральний кут при кінцевому радіусі поперечної кривизни.

Траєкторія точки M дасть деяку криву CM (рис.2.1.). Для аналізу умов

руху точки ґрунтового шару запишемо її в вигляді $f(z, y)=0$.

З $\triangle OMB$:

$$\frac{z_i}{y_i} = \operatorname{tg} \frac{l}{2R_i};$$

R_i визначається з рівняння кола:

$$(z_i - R_i)^2 + y_i^2 = R_i^2, \quad \rightarrow \quad R_i = \frac{z_i^2 + y_i^2}{2z_i}.$$

Здійснивши підстановку отримаємо:

$$\frac{z_i}{y_i} = \operatorname{tg} \frac{l \cdot z_i}{z_i^2 + y_i^2}. \quad (2.2)$$

Вираз (2.2) є дуже незручним для подальшого використання через неможливість явного його запису у вигляді $z=z(y)$.

При графічній побудові з допомогою редакторів тривимірного твердотілого моделювання *КОМПАС-5.10 3D* та *T-Flex Parametric CAD Pro 7.0* дуг однакової довжини з різними радіусами (з достатньою щільністю), центри яких лежать на вертикалі, виявилось, що траєкторія т.М є дуже близькою до дуги кола, центр кривизни, якої лежить на осі Oy (рис. 2.1.). Зміна положення точки M на дузі $\cup CA$ характеризується кутом підйому φ_3 .

$$\varphi_3 = \arcsin\left(\frac{R(1 - \cos \varphi)}{r}\right). \quad (2.3)$$

Математичний запис наближеної траєкторії т.М у вибраній системі координат запишеться як:

$$z^2 + (y - (l - r))^2 = r^2. \quad (2.4)$$

При проведенні порівняння даних залежностей (2.4) та (2.2) в середовищі *Microsoft Excel-2000* максимальна відносна похибка по аплікаті z склала $\varepsilon_z=3,3\%$.

Звідки робимо висновок, що при будь-якій зміні радіуса R_i дуги $\cup(OM)_i$ в окремих паралельних площинах простору, траєкторія кожної частинки ґрунтового шару лежить на поверхні уявного циліндра радіусом r (рис. 2.2). Просторова траєкторія має вигляді деякої гвинтової кривої з певним кроком. Це дає

можливість використовувати відомі залежності для гвинтових кривих, зокрема, для визначення просторової кривизни траєкторії в будь-якій точці простору.

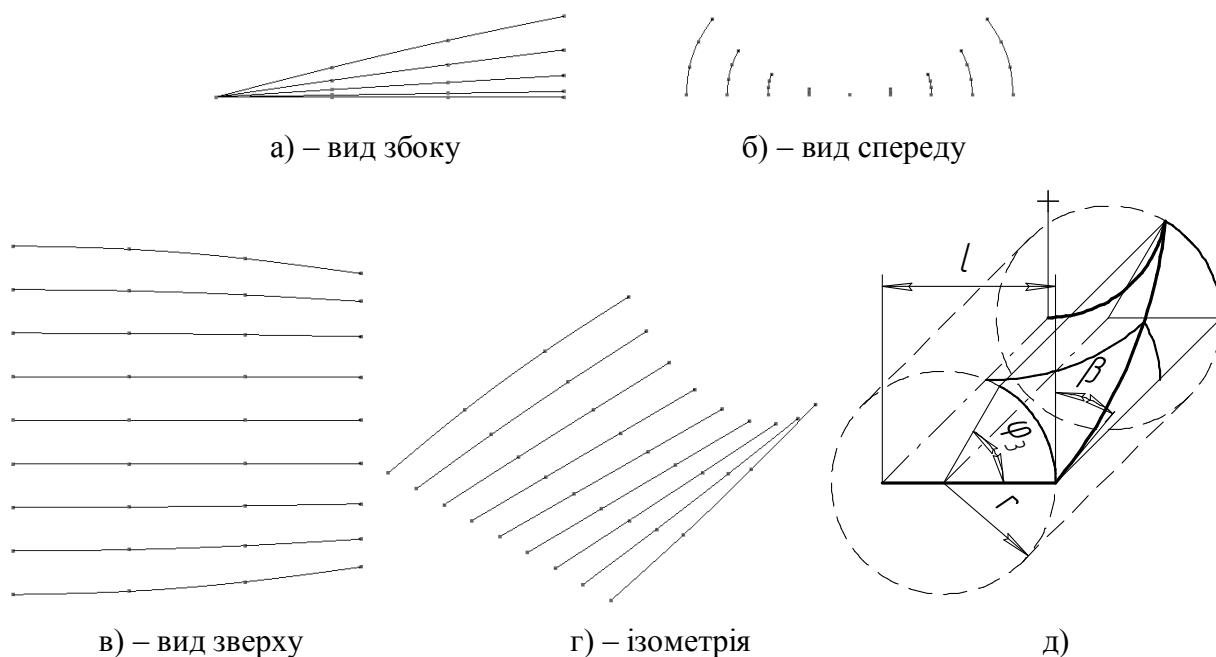


Рис. 2.2. Просторові траєкторії руху точок ґрунтового шару при русі поверхнею
а) – г) – моделювання в *T-Flex Parametric CAD Pro 7.0*; д) – параметри траєкторії.
($a=0,4$ м; $L=0,4$ м; $R_k=0,2$ м)

Радіус дуги $\cup(OM)$ r визначаємо з умови, що т. A мусить потрапити в т. A_1 , утворюючи при цьому дугу l радіусом l/π (рис. 2.1.), де $l=l_n$.

З прямокутного $\Delta A_1 O O_1$ запишемо:

$$A_1 O^2 + O O_1^2 = A_1 O_1^2; \quad \left(2 \frac{l_n}{\pi}\right)^2 + (l_n - r)^2 = r^2;$$

звідки, здійснивши перетворення, отримаємо величину радіуса дуги поперечної проекції просторової траєкторії кожної точки нижніх волокон ґрунтового шару при згині:

$$r = \frac{4 + \pi^2}{2\pi^2} l_n \approx 0,702 \cdot l_n. \quad (2.5)$$

Крім геометричних параметрів, рівноцінність деформаційних умов по дузі l повинні забезпечувати і кінематичні параметри. Запишемо зміну координат т. M від її положення в просторі при згині як для дуги нейтрального ша-

ру. Розглянемо рух точки M відносно т. O_1 (в рівняннях індекс – 1) та т. O_2 (в рівняннях індекс – 2) (рис. 2.1.).

$$\begin{cases} z_{1t} = R_t(1 - \cos \varphi_t) = \frac{l_n}{\varphi_t}(1 - \cos \varphi_t) \\ y_{1t} = R_t \sin \varphi_t = \frac{l_n}{\varphi_t} \sin \varphi_t \end{cases} ; \quad \begin{cases} z_{2t} = r \sin \varphi_{3t} \\ y_{2t} = r \cos \varphi_{3t} + l_n - r \end{cases} \quad (2.6)$$

Швидкості зміни координат та їх прискорення:

$$\begin{cases} V_{1z} = \dot{z}_{1t} = \dot{\varphi}_t \left(\frac{-l_n}{\varphi_t^2} (1 - \cos \varphi_t) + \frac{l_n}{\varphi_t} \sin \varphi_t \right) \\ V_{1y} = \dot{y}_{1t} = \dot{\varphi}_t \left(\frac{-l_n}{\varphi_t^2} \sin \varphi_t + \frac{l_n}{\varphi_t} \cos \varphi_t \right) \end{cases} ; \quad \begin{cases} V_{2z} = \dot{z}_{2t} = r \cos \varphi_{3t} \cdot \dot{\varphi}_{3t} \\ V_{2y} = \dot{y}_{2t} = -r \sin \varphi_{3t} \cdot \dot{\varphi}_{3t} \end{cases} ; \quad (2.7)$$

$$\begin{cases} a_{1z} = \ddot{z}_{1t} = \dot{\varphi}_t^2 \left(\frac{2l_n}{\varphi_t^3} (1 - \cos \varphi_t) - \frac{2l_n}{\varphi_t^2} \sin \varphi_t + \frac{l_n}{\varphi_t} \cos \varphi_t \right) + \ddot{\varphi}_t \left(\frac{l_n}{\varphi_t} \sin \varphi_t - \frac{l_n}{\varphi_t^2} (1 - \cos \varphi_t) \right) \\ a_{1y} = \ddot{y}_{1t} = \dot{\varphi}_t^2 \left(\frac{2l_n}{\varphi_t^3} \sin \varphi_t - \frac{2l_n}{\varphi_t^2} \cos \varphi_t - \frac{l_n}{\varphi_t} \sin \varphi_t \right) + \ddot{\varphi}_t \left(\frac{l_n}{\varphi_t} \cos \varphi_t - \frac{l_n}{\varphi_t^2} \sin \varphi_t \right) \end{cases} ;$$

$$\begin{cases} a_{2z} = \ddot{z}_{2t} = -r \sin \varphi_{3t} \cdot \dot{\varphi}_{3t}^2 + r \cos \varphi_{3t} \cdot \ddot{\varphi}_{3t} \\ a_{2y} = \ddot{y}_{2t} = -r \cos \varphi_{3t} \cdot \dot{\varphi}_{3t}^2 - r \sin \varphi_{3t} \cdot \ddot{\varphi}_{3t} \end{cases} \quad (2.8)$$

Для визначення раціональних кінематичних режимів згину ґрунтового шару в середовищі *Machcad 2000 Professional* було проаналізовано рух частинки ґрунтового шару (т. M) при різних режимах руху: прискорений – $\ddot{\varphi} > 0$, $\ddot{\varphi}_3 > 0$; рівномірний – $\ddot{\varphi} = 0$, $\ddot{\varphi}_3 = 0$; сповільнений – $\ddot{\varphi} < 0$, $\ddot{\varphi}_3 < 0$ (рис. 2.3.).

Аналіз отриманих графічних залежностей на рис. 2.3. з точки зору інерційності дав наступні результати.

Відносно т. O_1 :

– *прискорений* ($\ddot{\varphi} > 0$): на початку дуги l переважає інерційне вертикальне підйомне навантаження, на кінці дуги l переважає інерційне горизонтальне стискаюче навантаження;

рівномірний ($\ddot{\varphi} = 0$): інерційні навантаження по дузі l мінімальні;

– *сповільнений* ($\ddot{\varphi} < 0$): на початку дуги l переважає інерційне вертика-

льне втискаюче навантаження, на кінці дуги l переважає інерційне горизонтальне втискаюче навантаження.

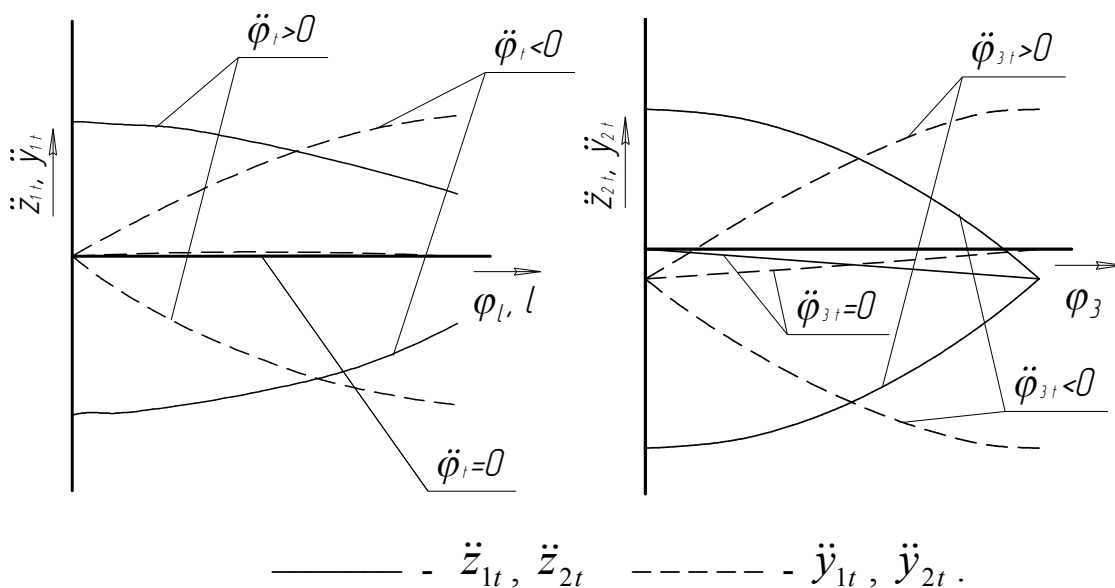


Рис. 2.3. Кінематика руху точки ґрунтового шару

Відносно т. O_2 :

- *прискорений* ($\ddot{\varphi}_3 > 0$): на початку згину переважає інерційне вертикальне підйомне навантаження, в кінці згину переважає інерційне горизонтальне стискаюче навантаження (при симетричному згині);
- *рівномірний* ($\ddot{\varphi}_3 = 0$): інерційні навантаження мінімальні;
- *сповільнений* ($\ddot{\varphi}_3 < 0$): на початку згину переважає інерційне вертикальне втискаюче навантаження, в кінці згину переважає інерційне горизонтальне втискаюче навантаження.

Інерційні стискаючі навантаження створюють передумови для збільшення енергоємності та утворення ядер ущільнення на ґрунторозпушувальній поверхні.

З умови забезпечення однакових інерційних умов навантаження по всій дузі приймаємо рівномірний характер згину ($\ddot{\varphi} = 0, \ddot{\varphi}_3 = 0$).

Отже, ґрунторозпушувальна поверхня повинна утворюватися сукупніс-

тю поперечних перерізів у вигляді дуг кіл. При русі поверхнею кожна точка ґрунтового шару описує у просторі траєкторію, яка лежить на поверхні уявного циліндра. Швидкості згину ґрунтового шару та розриву його волокон мають бути сталими.

2.2. Визначення та аналіз математичної моделі форми ґрунторозпушувальної поверхні

Форма ґрунторозпушувальної поверхні характеризується законом зміни радіуса поперечної кривизни вздовж поверхні – математичною моделлю поверхні. Критерієм є мінімізація енерго- та матеріаловитрат через знаходження найкоротших траєкторій точок ґрунтової скиби при заданих ґрунтових та кінематичних умовах (п. 2.1.).

На основі попередніх експериментальних досліджень визначено зону початку подрібнення ґрунтової скиби згином (поява перших тріщин). В більшості випадків ця зона знаходиться на середині нейтральної лінії початкового поперечного перерізу ґрунтової скиби. Зростання інтенсивності подрібнення проходить в напрямку до поверхні (рис. 2.4.). Шари ґрунту, які контактують з поверхнею приймаються за розрахункові.

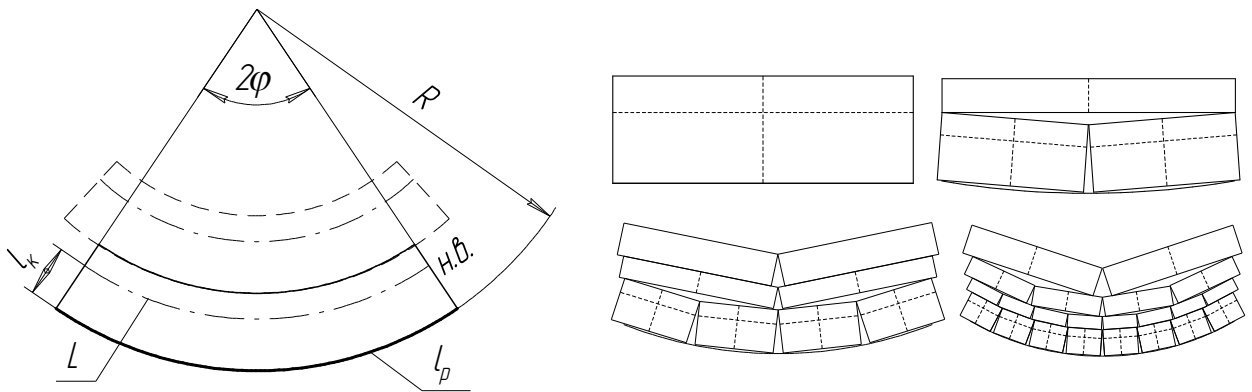


Рис. 2.4. Розрахункова схема та стадії подрібнення ґрунтової скиби згином

Величина ґрунтоагрегатів, які утворюються на поточній стадії подрібнення визначиться як:

$$l_k^{(n)} = h \left[\left(\frac{k_h}{k_h + 1} \right)^{n-1} - \left(\frac{k_h}{k_h + 1} \right)^n \right] = \frac{h}{k_h} \left(\frac{k_h}{k_h + 1} \right)^n. \quad (2.9)$$

де $l_{\kappa}^{(n)}$ – величина структурних агрегатів, які утворюються при $n^{\text{й}}$ -стадії под-
рібнення ґрунтового шару поверхнею; n – кількість циклів горизонтальних ро-
зшарувань, $n=1, 2, \dots, (m-1)$; $n=m$, при $l_{\kappa}^{(n)}=l_{\kappa}$.

$$m = \frac{\ln l_{\kappa}^{\text{позп}} - \ln h}{\ln k_h - \ln(k_h + 1)}; \quad \text{де} \quad l_{\kappa}^{\text{позп}} = \frac{2\varepsilon_p R_{\kappa}}{1 - 2\varepsilon_p}.$$

Математичну модель форми ґрунторозпушувальної поверхні знаходимо методом варіаційного обчислення орієнтуючись на параметри прилягаючого до поверхні шару ґрунту.

Згідно схеми на рис. 2.4. можна записати:

$$2\varphi_{(x)} = \frac{L}{R_{(x)} - l_{\kappa}} = \frac{l_p}{R_{(x)}}; \quad (2.10)$$

де L – початкова ширина ґрунтової скиби; l_{κ} – мінімальна товщина ґрун-
тового шару під нейтральною лінією при останньому горизонтальному розша-
руванні, яка дорівнює величині поперечника заданого ґрунтового агрегату; $R_{(x)}$ –
закон зміни радіуса поперечної кривизни поверхні в функції повздовжньої
координати.

З виразу (2.10) довжина дуги нижніх волокон:

$$l_p = \frac{L \cdot R_{(x)}}{R_{(x)} - l_{\kappa}}.$$

Приріст деформації розтягу нижніх волокон ґрунтової скиби на дузі по-
перечного перерізу поверхні відносно зміни повздовжньої координати:

$$\frac{dl_p}{dx} = \frac{L \frac{dR_{(x)}}{dx} (R_{(x)} - l_{\kappa}) - R_{(x)} L \frac{dR_{(x)}}{dx}}{(R_{(x)} - l_{\kappa})^2} = \frac{-L \cdot l_{\kappa}}{(R_{(x)} - l_{\kappa})^2} \cdot \frac{dR_{(x)}}{dx}.$$

Тоді, швидкість розтягу нижніх волокон ґрунтової скиби:

$$\frac{dl_p}{dt} = V_{\text{азр}} \cdot \frac{dl_p}{dx} = V_{\text{азр}} \cdot \frac{-L \cdot l_{\kappa}}{(R_{(x)} - l_{\kappa})^2} \frac{dR_{(x)}}{dx}.$$

Звідки функціонал мінімізації часу:

$$t = \frac{-1}{V_{azp} L \cdot l_{\kappa}} \int_0^{2\varepsilon_p L} \frac{(R_{(x)} - l_{\kappa})^2}{\frac{dR_{(x)}}{dx}} dl_p. \quad (2.11)$$

Врахувавши згідно нерозривності руху ґрунтового шару зв'язок швидкості деформації V_{∂} та поступального руху поверхнею V_{azp} :

$$\frac{dl_p}{dx} = \frac{V_{\partial}}{V_{azp}};$$

та додавши граничні умови на початку та кінці поверхні отримаємо систему для визначення закону зміни радіуса поперечного перерізу ґрунторозпушувальної поверхні:

$$\left\{ \begin{array}{l} t = \frac{-V_{\partial}}{L \cdot l_{\kappa} \cdot V_{azp}^2} \int_0^a \frac{(R_{(x)} - l_{\kappa})^2}{\frac{dR_{(x)}}{dx}} dx, \\ R_{(x)}|_{x=0} = \infty, \\ R_{(x)}|_{x=a} = R_{\kappa}. \end{array} \right. \quad (2.12)$$

a – довжина ґрунторозпушувальної поверхні, $x \in [0; a]$.

Підінтегральна функція функціонала не залежить явно від аргументу.

$$F = f(R_{(x)}, R'_{(x)}); \quad F_{R R'} > 0.$$

За умовою Лежандра має місце мінімум.

Тоді, перший інтеграл Ейлера має вигляд $F - R' \cdot F_{R'} = C$:

$$\frac{(R_{(x)} - l_{\kappa})^2}{\frac{dR_{(x)}}{dx}} - \frac{dR_{(x)}}{dx} \frac{(-1)(R_{(x)} - l_{\kappa})^2}{\left(\frac{dR_{(x)}}{dx}\right)^2} = C.$$

Після спрощення отримаємо лінійне однорідне диференціальне рівняння першого порядку, розв'язавши його методом розділення змінних:

$$\frac{dR_{(x)}}{dx} = \frac{(R_{(x)} - l_{\kappa})^2}{C_1}; \quad \int \frac{dR_{(x)}}{(R_{(x)} - l_{\kappa})^2} = \frac{1}{C_1} \int dx; \quad \frac{C_2}{R_{(x)} - l_{\kappa}} = x + C_3.$$

$$R_{(x)}|_{x=0} = \infty; \quad \frac{C_2}{\infty - l_{\kappa}} = 0 + C_3, \quad \rightarrow \quad C_3 = 0;$$

$$R_{(x)}|_{x=a} = R_{\kappa} : \quad \frac{C_2}{R_{\kappa} - l_{\kappa}} = a + 0, \quad \rightarrow \quad C_2 = a(R_{\kappa} - l_{\kappa});$$

отримали закон зміни радіуса кривизни поперечного перерізу поверхні:

$$R_{(x)} = \frac{a}{x}(R_{\kappa} - l_{\kappa}) + l_{\kappa}. \quad (2.13)$$

Рівняння форми ґрунторозпушувальної поверхні запишеться через рівняння поточного поперечного перерізу у вигляді дуги кола, для обраної системи координат:

$$(z - R_{(x)})^2 + y^2 = R_{(x)}^2. \quad (2.14)$$

Математичну модель форми поверхні у вигляді $z=f(x, y)$ запишемо користуючись (2.13) та (2.14):

$$z = \frac{a}{x}(R_{\kappa} - l_{\kappa}) + l_{\kappa} - \sqrt{\left(\frac{a}{x}(R_{\kappa} - l_{\kappa}) + l_{\kappa}\right)^2 - y^2}. \quad (2.15)$$

За знайденим законом зміни радіуса поперечної кривизни (2.13) у редакторі параметричного твердотілого моделювання *T-Flex Parametric CAD Pro 7.0* була змодельована поверхня (рис. 2.5.а). В параметричній формі було задано зміну поперечного перерізу та за допомогою вбудованих функцій були сполучені в поверхню.

Параметри, що обмежують поверхню, приймалися за найбільш подібною – лінійчатою [108, 129]: довжина – $a=0,4$ м; ширина – $L=0,35$ м; кінцевий радіус – $R_{\kappa}=0,2$ м.

З виразів (2.13) та (2.14) видно, що форму поверхні, а, отже, і інтенсивність подрібнення, визначають декілька параметрів ($a, R_{\kappa}, l_{\kappa}$). Фіксуючи відносну зміну величини радіуса (2.13) при виключенні досліджуваного параметра ($a, R_{\kappa}, l_{\kappa}$) визначено вагомість параметрів. Істотний вплив на форму поверхні має її довжина a (до 145%) та кінцевий поперечний радіус R_{κ} (до 105%). Вплив величини отримуваних структурних агрегатів l_{κ} є дуже незначним (<5%) і ним, при необхідності, можна знехтувати.

Враховуючи це, спрощені вирази для радіуса поточного поперечного перерізу та поверхні матимуть вигляд:

$$R_{(x)} = \frac{a}{x} R_{\kappa}; \quad (2.16)$$

$$z = \frac{a}{x} R_{\kappa} - \sqrt{\left(\frac{a}{x} R_{\kappa}\right)^2 - y^2}. \quad (2.17)$$

Розгортність поверхні перевіряється за наступною умовою [23]:

$$T_R = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}\right)^2 = 0.$$

В нашому випадку $T_R \neq 0$ (дод. Б.4.), тобто, поверхня є нерозгортною.

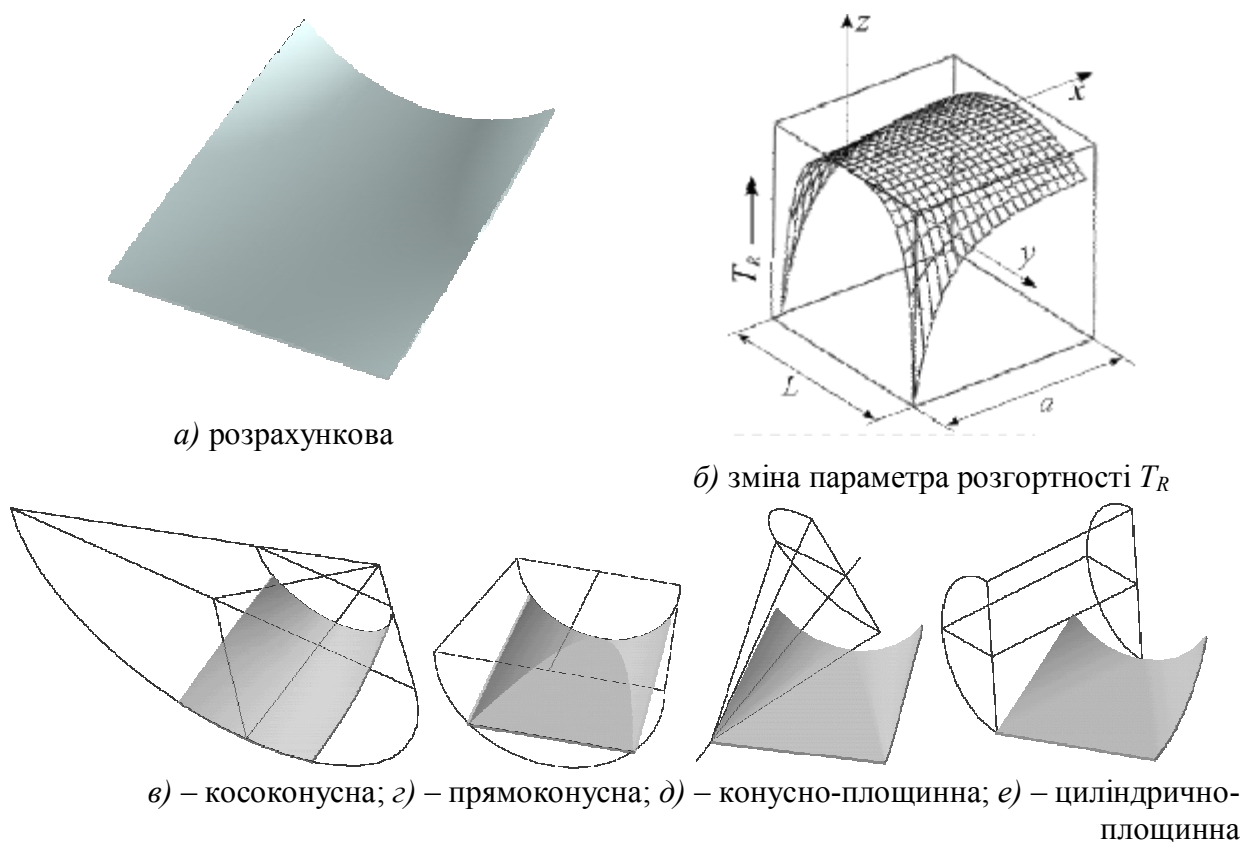


Рис. 2.5. Форма ґрунторозпушувальної поверхні

Істотне відхилення від розгортності спостерігається в крайніх точках на початку поверхні (рис. 2.5.б). Це майже не впливає на процес ґрунтообробітку, але зумовлює незручності при виготовленні поверхні. Бажано мати розгортну форму. Отримана поверхня є близькою до розгортної. Ґрунтуючись на цьому, приведемо декілька наближених розгортних поверхонь. Враховуючи умову лінійчатості, це будуть частини поверхонь конуса, циліндра та площини. Виходячи з візуального вигляду поверхні (рис. 2.5.б) замінюємо середню її час-

тину трикутною площиною, а пелюстки будемо утворювати з частин конуса чи циліндра (рис. 2.5.в-е).

Проведене геометричне порівняння розрахункової поверхні з лінійчатою [48, 59] та наближеними. Фіксувалися відхилення координат точок поперечних перерізів кожної з поверхонь ($s = \sqrt{\Delta y^2 + \Delta z^2}$), при поточних значеннях по-здовжньої координати “ x ” з однаковим положенням на дузі l . У відношенні до довжини півдуги поперечного перерізу l максимальні відхилення становлять: лінійчата – 2,6%; косоконусна – 9,3%; прямоконусна – 9,8%; конусно-площинна – 6,4%; циліндрично-конусна – 10,3%.

Абсолютні значення відхилень s , при наступних параметрах поверхні: $R_k=0,18$ м, $a=0,4$ м, $L=0,3$ м становлять, відповідно: 3,7 мм; 13,2 мм; 13,8 мм; 9,1 мм; 14,6 мм.

Близькість форм лінійчатої і розрахункової поверхні говорить про позитивність використання поверхонь з двоплощинним деформуванням ґрунтового шару.

Найближчою з наближених поверхонь є конусно-площинна. Недоліком її є те, що вона має максимальні відхилення в середині пелюсток поверхні, що може спричинити ризик утворення ядер ущільнення.

Параметричні рівняння наближених поверхонь:

– косоконусна: $y=R_{(x)}\sin(l/R_{(x)})$; $z=R_{(x)}(1-\cos(l/R_{(x)}))$; $R_{(x)}=R_n-(R_n-R_k)x/a$;
 $R_n=(3,5\dots 4)R_k$;

– прямоконусна: при $l \leq l_{nl}$ $y=l$; $z=0$; при $l > l_{nl}$: $y=R_{(x)}\sin(l/R_{(x)})$; $z=R_k - R_{(x)}\cos(l/R_{(x)})$; де l_{nl} – частина дуги поперечного перерізу, від площини симетрії, яка належить денній поверхні: $l_{nl} = \sqrt{(R_n - (R_n - R_k)x/a)^2 - R_k^2}$; $R_{(x)}=R_n - (R_n - R_k)x/a$; $R_n = \sqrt{L^2/4 + R_k^2}$;

конусно-площинна: при $l \leq l_{nl}$ $y=l$; $z=0$; при $l > l_{nl}$: $y=l_{nl} + R_{(x)}\sin[(l-l_{nl})/R_{(x)}]$;
 $z=R_{(x)}(1-\cos[(l-l_{nl})/R_{(x)}])$ де $R_{(x)}=R_k \cdot x/a$; $l_{nl}=(1-x/a)L/2$;

– циліндрично-площинна: при $l \leq l_{nl}$: $y=l$; $z=0$; при $l > l_{nl}$: $y=l_{nl} + R_{(x)}\sin[(l-l_{nl})/R_{(x)}]$;
 $z=R_{(x)}(1-\cos[(l-l_{nl})/R_{(x)}])$; де $R_{(x)}=R_k$, $l_{nl}=(1-x/a)L/2$.

Отже, форма ґрунторозпушувальної поверхні описується виразами (2.15) та (2.17), в яких закон зміни радіуса поперечної кривизни має обернено пропорційну залежність від повздовжньої координати. Найбільш вагомими параметрами поверхні, що визначають форму, є її довжина та кінцевий поперечний радіус. Невеликі відхилення (<11%) дають право на можливість заміни на практиці розрахункової поверхні (при складності її виготовлення) на розглянуті наближені розгортні поверхні. Форма розрахункова поверхні є близькою до лінійчатої з відповідними параметрами.

2.3. Визначення основних параметрів ґрунторозпушувальної поверхні

2.3.1. Обґрунтування радіуса кінцевої кривизни поверхні

Кінцева кривизна поверхні є основним чинником отримання заданої якості розпушення ґрунту. Внаслідок значення радіуса кінцевої кривизни поверхні ґрунтова скиба отримує граничну деформацію.

Скиба ґрунту руйнується згином внаслідок досягнення його нижніми волокнами граничної деформації розриву. При остаточному горизонтальному розшаруванні віддалей між горизонтальними шарами повинна дорівнювати заданій величині поперечника ґрунтового агрегату l_k .

Критерієм обґрунтування є якісні показники розпушення ґрунту. Величина радіуса кінцевої кривизни поверхні визначається в залежності від фізико-механічних характеристик ґрунту та агротехнічних вимог через геометричні залежності поперечного перерізу поверхні (рис. 2.4.). Для цього, по дузі, яка лежить посередині між нейтральною та крайньою дугою, необхідно забезпечити досягнення граничної деформації шару ґрунту на розрив.

Тоді, згідно рис. 2.4., для кінцевого поперечного перерізу запишеться залежність:

$$2\varphi_k = \frac{L(1 + \varepsilon_p)}{R_k - l_k / 2} = \frac{L}{R_k - l_k} \quad (2.18)$$

де ε_p – гранична відносна деформація ґрунту на розрив;

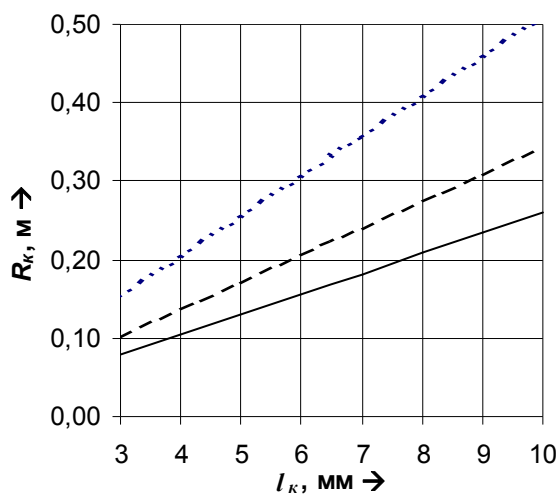
l_k – величина поперечника ґрунтового агрегату [93].

Звідки радіус кінцевої поперечної кривизни в залежності від його фізико-механічних характеристик:

$$R_k = \frac{l_k}{2\varepsilon_p} + l_k = l_k \left(\frac{1}{2\varepsilon_p} + 1 \right); \quad (2.19)$$

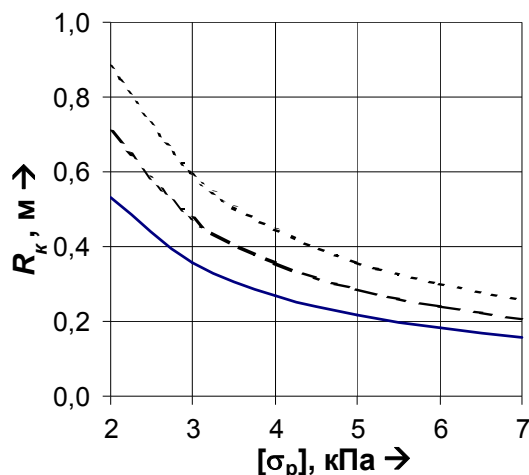
Або, врахувавши умову руйнування розривом у вигляді: $\sigma_p = E\varepsilon_p \geq \sigma_{zp}$; де σ_p – напруження розтягу, що виникають при згині ґрунтового шару вздовж лінії, яка знаходиться на віддалі $l_k/2$ від нижнього краю; E – модуль пружної деформації ґрунту на розрив; σ_{zp} – гранична напруга ґрунту на розрив:

$$R_k = l_k \left(\frac{E}{2\sigma_{zp}} + 1 \right). \quad (2.20)$$



..... – $\varepsilon_p=1,0\%$; - - - - - – $\varepsilon_p=1,5\%$;
 _____ – $\varepsilon_p=2,0\%$.

Рис. 2.6. Визначення радіуса кінцевої поперечної кривизни



..... – $E=400$ кПа; - - - - - – $E=300$ кПа;
 _____ – $E=200$ кПа.

Рис. 2.7. Залежність радіуса згину від міцності ґрунту

Радіус згину є пропорційним величині утворюваних агрегатів та модуля пружної деформації, і має обернену пропорційність до міцності ґрунту (рис. 2.6., 2.7.).

Для розпушення ґрунтів ($l_k=5...7$ мм) із найпоширенішими характеристиками ($\sigma_{kp}=3...7$ кПа, $\varepsilon_p=1...2\%$) кінцевий радіус поперечної кривизни повинен становити для підорних шарів $R_k=0,25-0,41$ м, для орних – $R_k=0,13-0,21$ м. Це відповідає і доповнює дані попередніх досліджень [108, 140], що підтверджує

правильність вибору схеми і передумов подрібнення ґрунтової скиби згином.

2.3.2. Визначення ширини поверхні

Внаслідок дугового кінцевого перерізу поверхні, ширина поверхні впливає на співвідношення видів деформації в поперечному перерізі ґрунтової скиби, і, як наслідок, на прохідність ґрунтового шару. Ширина захвату повинна такою, щоб ґрунт при подрібненні не затискувався між боковими пелюстками поверхні на виході з неї та не здійснював переворот. Для цього вона повинна бути узгоджена з радіусом кінцевого перерізу поверхні.

З геометричної точки зору, очевидним є те, що для забезпечення неперевертання, максимальна ширина поверхні повинна дорівнювати величині півдуги кола вихідного поперечного перерізу:

$$L = \pi R_k. \quad (2.21)$$

Геометрична умова не є достатньою при визначенні ширини захвату так, як вона не враховує силові фактори. Вона може виступати лише як перевірка ширини на абсолютний максимум.

Згідно розрахункової схеми (рис. 2.8.), для зменшення енергоємності процесу, максимальна ширина поверхні повинна виключити переважання енергоємних видів деформацій на пелюстках поверхні. Для цього необхідно мінімізувати модуль різниці значень вертикальної та горизонтальної реакцій з боку поверхні на ґрунтовий шар:

$$|V_n - H_c| \rightarrow \min.$$

При переважанні величини вертикальної реакції V_n над H_c (рис. 2.8.) скиба ґрунту буде деформуватися більше від згину ніж від стиску, і, навпаки, при H_c – від стиску. Стиск ґрунтової скиби внаслідок різкого зростання енергоємності процесу є небажаним.

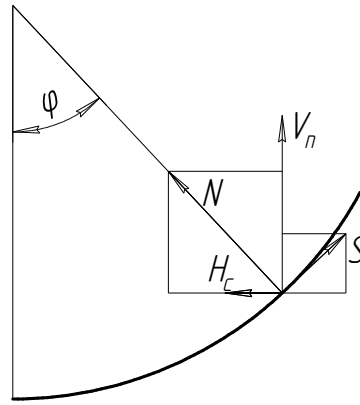


Рис. 2.8. Схема до визначення ширини поверхні (активні зусилля не показані)

Тоді, необхідною умовою буде: $V_n \geq H_c$, де згідно до рис. 2.8.

$$\begin{cases} V_n = N \cdot \cos \varphi + S \cdot \sin \varphi, \\ H_c = N \cdot \sin \varphi - S \cdot \cos \varphi; \end{cases} \quad (2.22)$$

Звідки:

$$N \cdot \cos \varphi + S \cdot \sin \varphi \geq N \cdot \sin \varphi - S \cdot \cos \varphi; \rightarrow (N+S) - (N-S) \cdot \operatorname{tg} \varphi \geq 0; \rightarrow \varphi \leq \operatorname{arctg} \frac{N+S}{N-S}.$$

При розгляді силової взаємодії ґрунтового шару з поверхнею (п. 2.5.) виявлено, що $S \in (0; -0,2N]$ ($\alpha_p = 0 \dots 30^\circ$). Тоді, відповідно, при $S=0$ – $\varphi \leq \frac{\pi}{4}$, а при $S = -0,2N$ – $\varphi \leq 0,6$. Підставивши отримані значення S та φ в другу рівність системи (2.22), побачимо, що при визначенні зусилля затискання H_c неврахування S (при $\varphi = \frac{\pi}{4}$) викликає незначну похибку до 2,5%. Тому, нехтуючи S , маємо:

$$\varphi = \frac{\pi}{4}.$$

Врахувавши (2.1), граничне значення ширини захвату поверхні:

$$L = \frac{\pi}{2} R_k. \quad (2.23)$$

З (2.21) та (2.23) видно, що ширина поверхні визначена з точки зору неперевертання буде завжди у два рази більша.

Визначення ширини поверхні за (2.23) справедливе при будь-якій висоті ґрунтової скиби. Незалежно від висоти скиби стискаючі зусилля переважають вертикальні при довжині дуги перерізу більшій за четвертину дуги кола.

Ширина захвату поверхні не залежить від величини силових факторів, а є пропорційною кінцевому радіусу R_k . Орієнтуючись на залежність R_k від типу ґрунтових характеристик (рис. 2.6, 2.7.), для орного шару у порівнянні з підорними шарами ширина захвату зменшується. Ширина поверхні для підорних шарів $L=0,39...0,61$ м, для орних – $L=0,20-0,33$ м.

2.3.3. Обґрунтування довжини ґрунторозпушувальної поверхні

Внаслідок криволінійності профілю ґрунторозпушувальної поверхні її довжина буде задавати інтенсивність навантаження ґрунтової скиби. Довжина поверхні повинна забезпечити умови подрібнення ґрунтової скиби при найменших затратах тягового зусилля та матеріалу.

Довжину поверхні a визначаємо методом екстремуму (методом Ферма), зважаючи на обернений зв'язок довжини поверхні зі швидкістю поперечної деформації розриву нижніх волокон ґрунтового шару.

Вираз для енерговитрат на поперечну деформацію розтягу, при русі ґрунтового шару вздовж поверхні:

$$W_{\partial} = P_{\partial} \cdot V_{agr}; \quad (2.24)$$

де P_{∂} – горизонтальна складова від зусилля деформації.

Швидкість деформації V_{∂} виражається через V_{agr} наступним чином:

$$\int_0^{2\varepsilon \cdot L} \frac{dl}{V_{\partial}} = \int_0^a \frac{dx}{V_{agr}}; \quad V_{agr} = \frac{a}{2\varepsilon \cdot L} V_{\partial}. \quad (2.25)$$

Враховуючи (2.25) вираз (2.24) запишеться як:

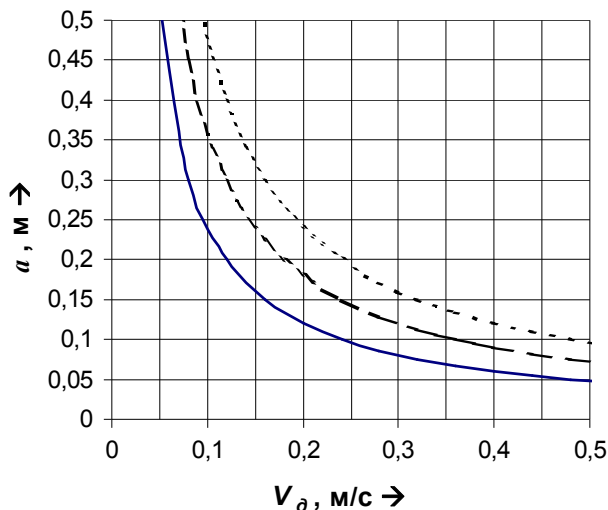
$$W_{\partial} = P_{\partial} \cdot a \cdot V_{\partial} / (2\varepsilon_p L).$$

Звідки видно, що довжина і швидкість деформації нижніх волокон ґрунтового шару в однаковій мірі впливають на енергоємність процесу. Розглянемо їх взаємну залежність. Виразивши з (2.25) довжину $a(V_{\partial})$ отримаємо:

$$a = \frac{2\varepsilon_p \cdot L \cdot V_{agr}}{V_{\partial}} \quad (2.26)$$

З виразу (2.26) залежність $a=f(V_{\partial})$ впливу довжини поверхні на швидкість деформації розриву при різних L та V_{agr} виступає у вигляді сімейства гі-

перболічних кривих (рис. 2.9.).



_____ – $V_{agp}=1,0$ м/с; _____ – $V_{agp}=1,5$ м/с; – $V_{agp}=2,0$ м/с.

Рис. 2.9. Вплив довжини поверхні на інтенсивність процесу ($L=0,4$ м;
 $\varepsilon_p=3\%$;))

Аналізуючи вираз (2.25) та графічні залежності на рис. 2.9. робимо наступні висновки:

- збільшення довжини a та швидкості деформації V_d в однаковій мірі збільшують енерговитрати, зменшенню енерговитрат сприяє парна мінімізація обох величин;

- при малих значеннях a , наступне відносно мале зменшення довжини призводить до збільшення в декілька разів швидкості деформації;

- при великих значеннях a зміна довжини поверхні не має істотного впливу на швидкість деформації.

Досягнення великої швидкості деформації призведе до зростання тягового опору внаслідок динамічного зростання міцності ґрунту [24, 116, 131], а отримання дуже малої швидкості, орієнтуючись на форму поверхні (рис. 2.5.), буде можливо на довгій поверхні, що призведе до перевитрат матеріальних ресурсів, збільшення розмірів, ваги та збільшення тягового опору внаслідок збільшення площі тертя ґрунту з поверхнею.

Тоді, раціональною вважаємо таку точку на кривій $a(V_d)$, де радіус її

кривизни є найменшим.

Методом екстремуму (методом Ферма) знайдемо вираз для знаходження довжини поверхні в цій точці. Для коректного застосування даного методу координатні осі на рис. 2.9. повинні мати однакову розмірність. Для цього помножимо чисельник і знаменник виразу (2.26) на час t , внаслідок чого в знаменнику отримаємо величину деформації розтягу ґрунтових волокон s_δ зі швидкістю V_δ за час t .

Залежність (2.26) запишеться у вигляді:

$$a = \frac{2\varepsilon_p \cdot L \cdot V_{azp} \cdot t}{s_\delta}. \quad (2.27)$$

Радіус кривизни кривої $a(s_\delta)$ визначається за залежністю [23]:

$$\rho_a = \frac{(1 + a_{s_\delta}^{\prime/2})^{\frac{3}{2}}}{a_{s_\delta}^{\prime\prime}} \rightarrow \min.$$

За теоремою Ферма:

$$\frac{d\rho_a}{ds_\delta} = \frac{\frac{3}{2}(1 + a_{s_\delta}^{\prime/2})^{\frac{3}{2}} \cdot 2 \cdot a_{s_\delta}^{\prime} \cdot a_{s_\delta}^{\prime\prime} \cdot a_{s_\delta}^{\prime\prime} - (1 + a_{s_\delta}^{\prime/2})^{\frac{1}{2}} \cdot a_{s_\delta}^{\prime\prime\prime}}{a_{s_\delta}^{\prime\prime 2}} = 0;$$

$$a_{s_\delta}^{\prime} = \frac{-L \cdot 2\varepsilon_p \cdot V_{azp} \cdot t}{s_\delta^2}; \quad a_{s_\delta}^{\prime\prime} = \frac{2 \cdot L \cdot 2\varepsilon_p \cdot V_{azp} \cdot t}{s_\delta^3}; \quad a_{s_\delta}^{\prime\prime\prime} = \frac{-6 \cdot L \cdot 2\varepsilon_p \cdot V_{azp} \cdot t}{s_\delta^4}.$$

Тоді:

$$\frac{-3 \left(1 + \frac{(L \cdot 2\varepsilon_p \cdot V_{azp} \cdot t)^2}{s_\delta^4}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (L \cdot 2\varepsilon_p \cdot V_{azp} \cdot t)^2 + \frac{3}{2} \left(1 + \frac{(L \cdot 2\varepsilon_p \cdot V_{azp} \cdot t)^2}{s_\delta^4}\right)^{\frac{3}{2}}}{(L \cdot 2\varepsilon_p \cdot V_{azp} \cdot t)^2 \cdot s_\delta^2} = 0;$$

$$2(s_\delta^4 + (L \cdot 2\varepsilon_p \cdot V_{azp} \cdot t)^2)^{\frac{1}{2}} \cdot (L \cdot 2\varepsilon_p \cdot V_{azp} \cdot t)^2 - (s_\delta^4 + (L \cdot 2\varepsilon_p \cdot V_{azp} \cdot t)^2)^{\frac{3}{2}} = 0;$$

$$(s_\delta^4 + (L \cdot 2\varepsilon_p \cdot V_{azp} \cdot t)^2)^{\frac{1}{2}} \cdot ((L \cdot 2\varepsilon_p \cdot V_{azp} \cdot t)^2 - s_\delta^4)^{\frac{3}{2}} = 0.$$

Звідки швидкість деформації в названій точці:

$$s_\delta = \sqrt{2\varepsilon_p \cdot L \cdot V_{azp} \cdot t}. \quad (2.28)$$

Підставивши (2.28) у (2.27) знайдемо:

$$a = \sqrt{2\varepsilon_p \cdot L \cdot V_{azp} \cdot t} . \quad (2.29)$$

Невідомим є час t . Для його знаходження запишемо (2.29) у вигляді:

$$t = \frac{a^2}{2\varepsilon_p \cdot L \cdot V_{azp}} .$$

Тут a визначається графічним методом за залежністю приведеною на рис. 2.9. Так, при $\varepsilon_p=0,03$, $L=0,4$ м, $V_{azp}=1,0; 1,5; 2,0$ м/с, $a=0,155; 0,190; 0,219$ м час $t=1,001; 1,003$ та $0,999$ с відповідно. Отже, приймаємо час $t=1$ с.

Графічно залежність довжини поверхні від швидкості руху агрегату матиме вигляд рис. 2.10.

Збільшення швидкості руху агрегату та ширини поверхні зумовлює подовження ґрунторозпушувальної поверхні. Для підорних шарів ґрунту, при однаковій ширині поверхні, вони є дещо коротші ніж для орного шару.

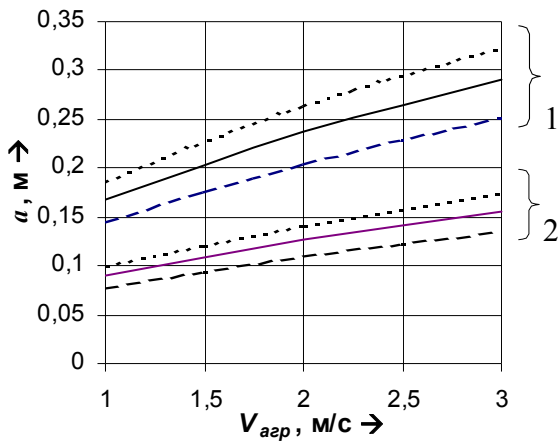
Довжина поверхні має суттєвий вплив на вид деформації скиби: три- або двоплощинна. Це залежить від співвідношення радіусів просторової та поперечної кривизни поверхні.

Кривизна траєкторій частинок ґрунтового шару, які рухаються поверхнею змінюється від нульової – в середині поверхні, до максимальної – на краю. Кривизна крайньої траєкторії задає найбільшу інтенсивність деформації ґрунтової скиби вздовж поверхні. При співрозмірності кривизни крайньої просторової траєкторії з кривизною кінцевого поперечного перерізу, деформацію вважаємо триплощинною. При відмінності значень радіусів кривизн більше ніж на порядок, при більшому радіусі кривизни просторової траєкторії, деформацію ґрунтового шару вважаємо двоплощинною.

Так, як траєкторія руху є гвинтова лінія, то радіус її кривизни [23] з врахуванням (2.3), (2.5) та (2.23) визначиться за формулою:

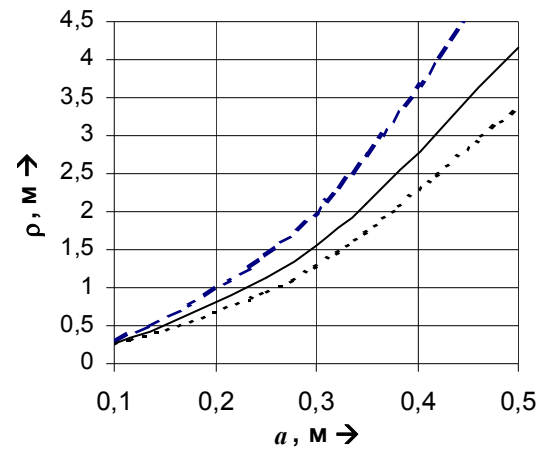
$$\rho = \frac{r^2 + (a/\varphi_{3к})^2}{r} = 0,351L + \frac{a^2}{0,351L \arcsin^2 \frac{R_\kappa (1 - \cos(0,5L/R_\kappa))}{0,351L}} \quad (2.30)$$

Графічна залежність $\rho=f(a)$ показана на рис. 2.11.



..... – $L=0,5$ м; _____ – $L=0,4$ м;
 - - - - - – $L=0,3$ м.
 1 – орний шар; 2 – підорні шари.

Рис. 2.10. Вплив швидкості агрегату на довжину поверхні



..... – $R_k=0,25$ м; _____ – $R_k=0,20$ м;
 - - - - - $R_k=0,15$ м.

Рис. 2.11. Залежність просторового радіуса траєкторії від радіуса кінцевого перерізу.

Згідно рис. 2.11. максимальна довжина поверхонь з триплощинним деформуванням для орних шарів становить $a=0,25$ м і $a=0,42$ м для підорних шарів.

Для врахування часу релаксації ґрунту необхідно використовувати поверхні довжиною $a=0,26...0,43$ м при швидкості руху $V_{agr}=1,5-2,5$ м/с.

З іншої сторони, якщо орієнтовно прийняти за час релаксації ґрунтів $0,17-0,18$ с [131], то при швидкості руху $V_{agr}=1,5-2,5$ м/с довжина поверхні повинна становити:

$$a=V_{agr} \cdot t_p=(1,5...2,5) \cdot 0,17=0,26...0,43 \text{ м.} \quad (2.31)$$

Якщо визначити довжину поверхні за (2.29), то в переважній більшості випадків отримаємо поверхні з двоплощинним деформуванням ґрунтової скиби.

Довші поверхні є більш лінійчатиими ніж коротші, тому сприяють легшому проходженню ґрунту. В відносно довгих поверхнях ($a>0,25$ м для орного шару, $a>0,42$ м для підорних шарів) переважає в основному двоплощинне руйнування, а в більш коротких – триплощинне. Збільшення швидкості руху та підвищення зв'язності ґрунту призводить до подовження поверхні.

2.4. Обґрунтування просторового рознесення ґрунторозпушувальних поверхонь ярусного глибокорозпушувача в площині руху

Обґрунтування раціональних параметрів просторового розміщення ґрунторозпушувальних поверхонь ярусного глибокорозпушувача, при врахуванні різних умов розпушення ґрунту в орному та підорних шарах, дає змогу зменшити загальний тяговий опір до 30-40% відносно суцільного обробітку на таку ж глибину [61,62]. Ґрунторозпушувальна поверхня, при цьому, в кожному ярусі повинна впливати на весь об'єм ґрунту, який нею обробляється.

Просторове розміщення ґрунторозпушувальних поверхонь ярусного глибокорозпушувача визначається кутом їх нахилу до дна борозни α_p , вертикальним h_i та горизонтальним d зміщенням лемешів в кожному ярусі. Кут α_p впливає на інтенсивність та рівномірність навантаження ґрунтової скиби. Товщина розробки ґрунту однією поверхнею є критерієм вертикального рознесення робочих елементів в ярусному робочому органі. Горизонтальне рознесення базується на врахуванні зони сколу ґрунту в нижніх ярусах (рис. 2.12.).

2.4.1. Кут встановлення ґрунторозпушувальної поверхні до дна борозни

Визначальним фактором в поверхнях з двоплощинним деформуванням ґрунтового шару виступає згин в поперечному перерізі. Розрахункова схема взаємодії ґрунту в поперечному перерізі поверхні показана на рис. 2.13.

Розглядаємо взаємодію поверхні з частинкою величиною l_k в поперечнику, до величини яких ґрунтовий шар повинен бути подрібнений. Згідно приведеної схеми в кожній точці діють такі сили: вага ґрунту – dG ; зчеплення dC_{34} ; поперечна реакція від лобової деформації ґрунту dP ; зусилля тертя ґрунту впоперек поверхні внаслідок деформації розриву – dF_f ; сили інерції обертального руху відносно т.О₁ (внаслідок просторової побудови поверхні): дотична – $dF_{\tau 1}$ та нормальна dF_{n1} ; сили інерції обертального руху відносно т.О₂ (внаслідок деформації розриву): дотична – $dF_{\tau 2}$ та нормальна dF_{n2} .

Дія ваги ґрунту dG_{zp} :

$$dG = \gamma \cdot \frac{dh}{\cos \alpha} \cdot dl_{\kappa}^2 \cdot \cos \alpha = \gamma \cdot dh \cdot dl_{\kappa}^2 \quad (2.32)$$

де γ – щільність ґрунту в природному стані; dh – висота ґрунтового шару (глибина розробки); α – кут нахилу поверхні до дна борозни.

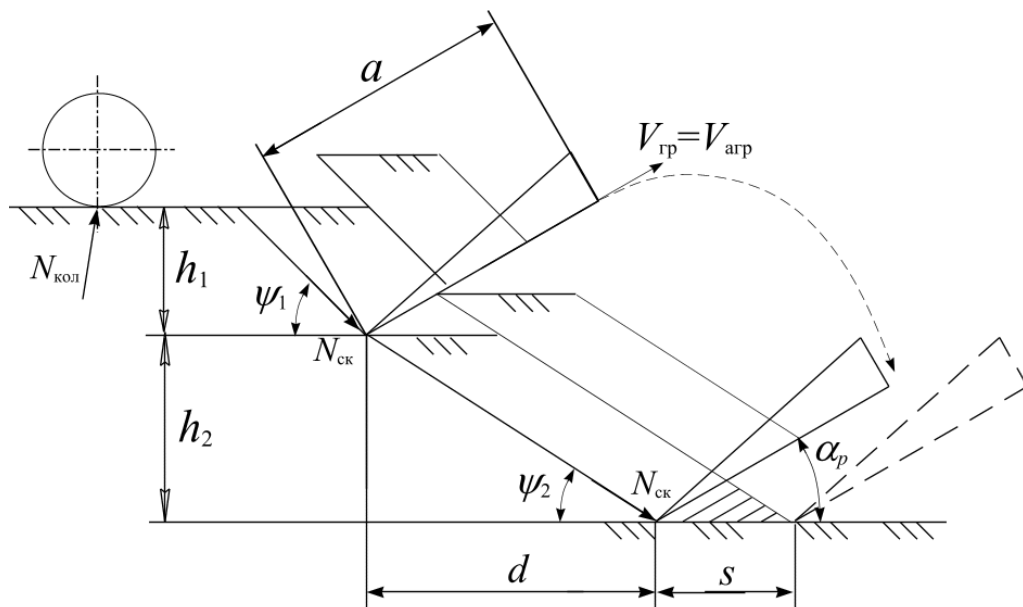


Рис. 2.12. Просторове розміщення ґрунторозпушувальних поверхонь в площині руху

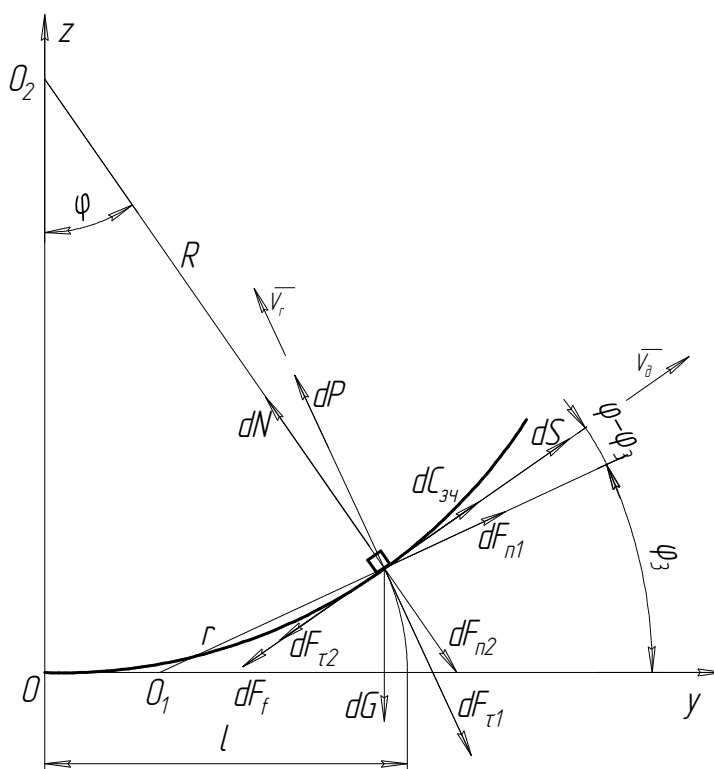


Рис. 2.13. Розрахункова схема зусиль у поперечному перерізі

Зусилля зчеплення dC_{34} залежить від типу ґрунту та його стану, характе-

ризує опір ґрунту деформації зсуву між сусідніми по вертикалі шарами.

$$dC_{зч} = C \cdot dl_{\kappa}^2 \quad (2.33)$$

де C – питоме зчеплення ґрунту.

Реакція dP залежить від опору лобової деформації ґрунту dP_2 . Згідно раціональної формули В.П. Горячкіна для визначення опору плугів:

$$dP = k \cdot dh \cdot dl_{\kappa}.$$

Тоді, згідно рис. 2.14.:

$$dP = k \cdot dh \cdot dl_{\kappa} \left(\frac{1}{2} \cos \alpha \sin 2\beta + \sin \alpha \cos \varphi_3 \right) \quad (2.34)$$

де k – питомий опір ґрунту; β – кут підйому просторової гвинтової траєкторії частинки (рис. 2.14.): $\beta = \arctg \frac{a}{r \cdot \varphi_{3\kappa}}$.

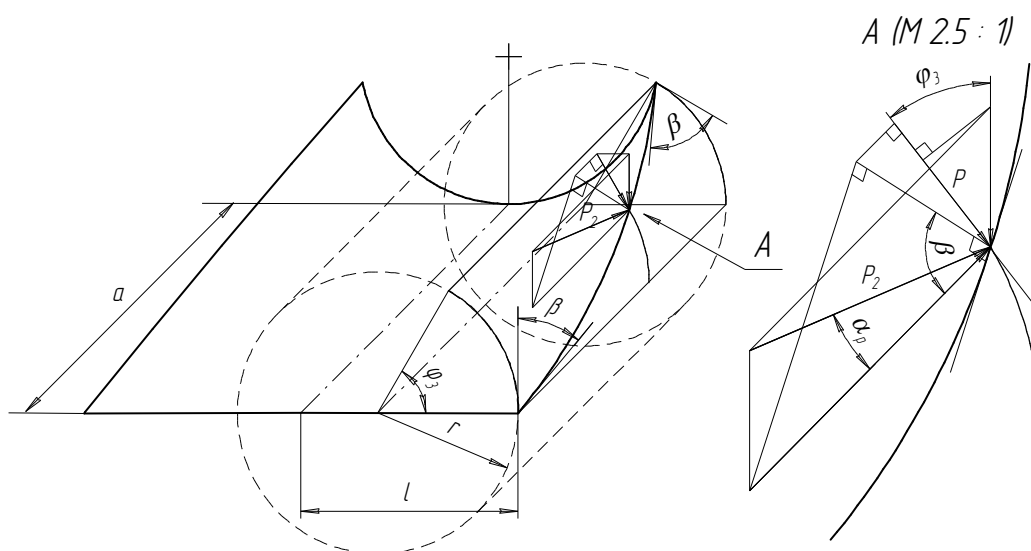


Рис. 2.14. Схема для визначення реакції від зусилля лобового тиску ґрунту

Зусилля тертя по поверхні:

$$dF_f = dN \cdot f ; \quad (2.35)$$

де f – коефіцієнт тертя ґрунту по сталі, N – нормальна реакція.

Інерційні зусилля:

$$\text{відносно } O_1: \quad \text{нормальні} - dF_{n1} = \frac{dG}{g} \frac{V_r^2}{r} ; \quad (2.36)$$

$$\text{тангенціальні} - dF_{\tau 1} = \frac{dG}{g} r \frac{d^2 \varphi_3}{dt^2} = \frac{dG}{g} \frac{dV_r}{dt}; \quad (2.37)$$

$$\text{відносно } O_2: \quad \text{нормальні} - dF_{n2} = \frac{dG}{g} \frac{V_\delta^2}{R_{(x)}}; \quad (2.38)$$

$$\text{тангенціальні} - dF_{\tau 2} = \frac{dG}{g} R_{(x)} \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \frac{dG}{g} \frac{dV_\delta}{dt}; \quad (2.39)$$

де V_r – швидкість руху частинки по кривій, яку вона описує в поперечному перерізі відносно т. O_1 ; V_δ – швидкість деформації розтягу; V_{agr} – швидкість руху розпушувача; r – радіус проекції траєкторії у поперечному перерізі; $R_{(x)}$ – радіус кривизни поточного поперечного перерізу; g – прискорення вільного падіння; t – час руху; φ – центральний кут дуги в поперечному перерізі; φ_3 – кут підйому частинки в поперечному перерізі.

Швидкість деформації V_δ є пропорційною до швидкості руху розпушувача V_{agr} : $V_r = V_{agr} \cdot \cos \beta$.

Спроектуювавши зусилля та реакції на відповідні осі отримаємо нормальну dN та дотичну реакцію dS , які сприяють подрібненню ґрунтового шару на окремі агрегати. Згідно до розрахункової схеми, зображеної на рис. 2.13.

$$\begin{cases} dS = dC_{34} - dF_f - dG \cdot \sin \varphi + dP \cdot \sin(\varphi - \varphi_3) - dF_{\tau 1} \cdot \sin(\varphi - \varphi_3) + dF_{n1} \cdot \cos(\varphi - \varphi_3) - dF_{\tau 2}; \\ dN = dG \cdot \cos \varphi + dP \cdot \cos(\varphi - \varphi_3) + dF_{\tau 1} \cdot \cos(\varphi - \varphi_3) + dF_{n1} \cdot \sin(\varphi - \varphi_3) + dF_{n2}. \end{cases} \quad (2.40)$$

Враховувавши, що $dF_f = dN \cdot f$, та, звівши подібні доданки, отримаємо вираз для зусилля розриву ґрунтового шару по дузі l :

$$\begin{aligned} dS = & dC_{34} - dG \cdot (\sin \varphi + f \cdot \cos \varphi) + dP \cdot (\sin(\varphi - \varphi_3) - f \cdot \cos(\varphi - \varphi_3)) - dF_{\tau 1} \cdot (\sin(\varphi - \varphi_3) + \\ & + f \cdot \cos(\varphi - \varphi_3)) + dF_{n1} \cdot (\cos(\varphi - \varphi_3) - f \cdot \sin(\varphi - \varphi_3)) - dF_{\tau 2} - f \cdot dF_{n2} \end{aligned} \quad (2.41)$$

З отриманого рівняння (2.41) видно, що дотичні інерційні сили $F_{\tau 1}$, $F_{\tau 2}$ однозначно негативно впливають на розривне зусилля dS . Так, як вони залежать від зміни швидкостей (2.37), (2.39), то для зменшення їх негативної дії бажаним буде сталість значень швидкостей $V_r = \text{const}_1$, $V_\delta = \text{const}_2$, що призведе до того, що $dF_{\tau 1} = dF_{\tau 2} = 0$, і це підтверджує висновки п. 2.1.2.

Тоді, (2.41) запишеться у вигляді:

$$dS = dC_{34} - dG \cdot (\sin\varphi + f \cdot \cos\varphi) + dP \cdot (\sin(\varphi - \varphi_3) - f \cdot \cos(\varphi - \varphi_3)) + \\ + dF_{n1} \cdot (\cos(\varphi - \varphi_3) - f \cdot \sin(\varphi - \varphi_3)) - f \cdot dF_{n2} \quad (2.42)$$

Характер навантаження ґрунтової скиби в кінцевому поперечному перерізі поверхні, як найбільш визначальному, було розглянуто з допомогою комп'ютерного моделювання (рис. 2.15.).

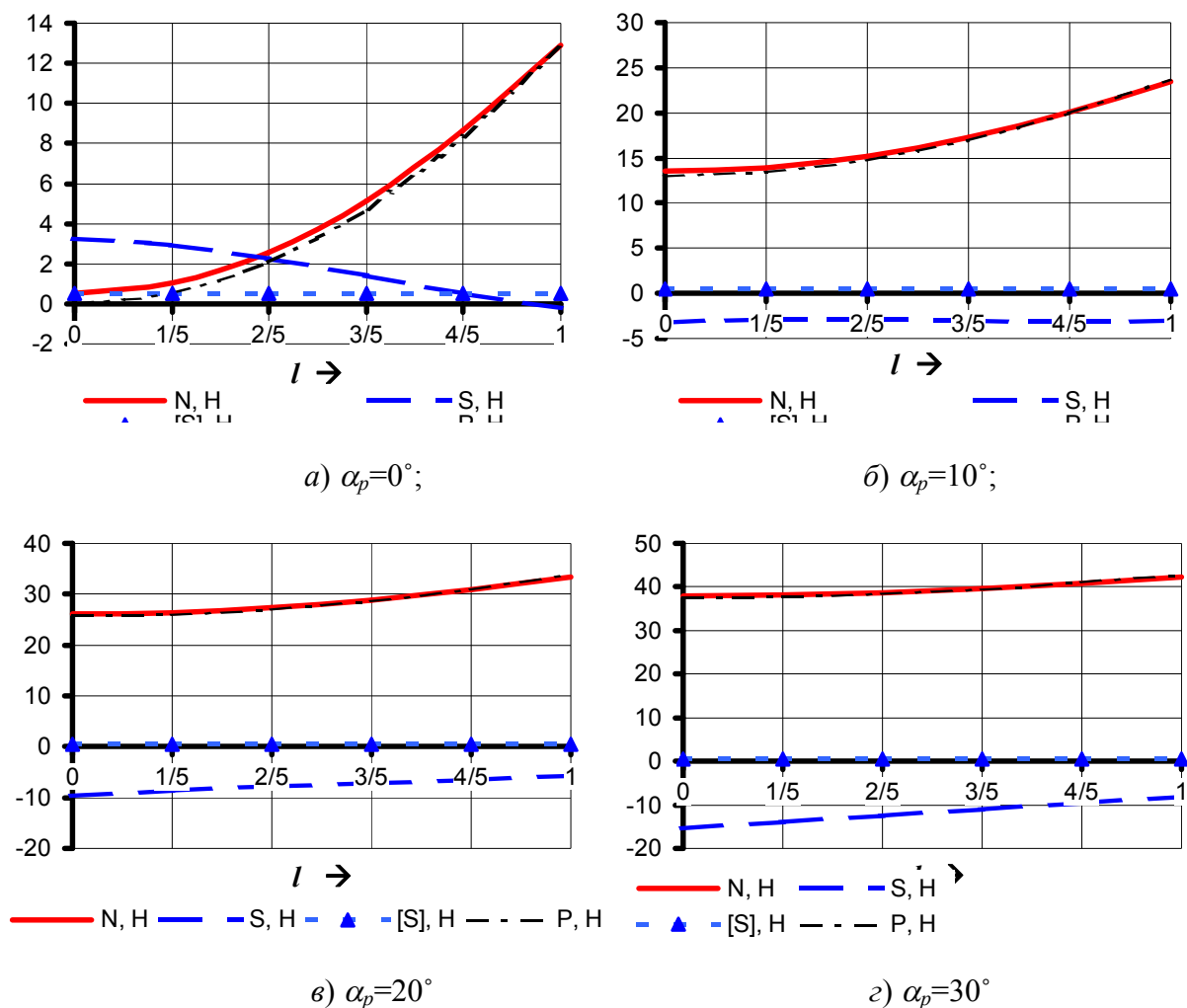


Рис. 2.15. Зміна зусиль по дузі поперечного перерізу (півповерхні)

($R_k=0,2$ м; $L=0,31$ м; $a=0,35$ м; $h=0,15$ м; $[\sigma_p]=5$ кПа; $\varepsilon_p=1,0\%$; $C_{34}=35$ кПа; $k=50$ кПа)

З рис. 2.15. видно, що незалежно від кута нахилу поверхні α , нормальна реакція поверхні визначається в основному лише реакцією від лобового тиску ґрунту перед поверхнею:

$$dN \approx dP. \quad (2.43)$$

Ця закономірність спостерігається на протязі всієї поверхні. Характер розподілу дотичних реакцій dS , суттєво змінюється від величини кута нахилу

поверхні α_p . Найкращі умови подрібнення ґрунту за рахунок дотичної реакції dS спостерігаються в середині поверхні при $\alpha_p \rightarrow 0$. На пелюстках поверхні ґрунтова скиба руйнується за рахунок нормальних реакцій dN , які створюють розривний момент відносно точки нейтральної лінії. При збільшенні кута α_p характер навантаження ґрунтової скиби вирівнюється по дузі l поперечного перерізу. При $\alpha_p=0^\circ$ спостерігається значна нерівномірність навантаження по дузі l , при $\alpha_p=30^\circ$ максимальне зростання dN по дузі l становить 11%. При подальшому збільшенні кута α_p , нерівномірність зменшується майже до нуля. Так, як з точки зору найменшого тягового зусилля, кут α_p повинен лежати в межах $15^\circ \dots 35^\circ$ [56, 57], то даний факт є підтвердженням вибору дугового поперечного перерізу з точки зору рівномірності навантаження ґрунтового шару в поперечному перерізі при мінімальних енерговитратах.

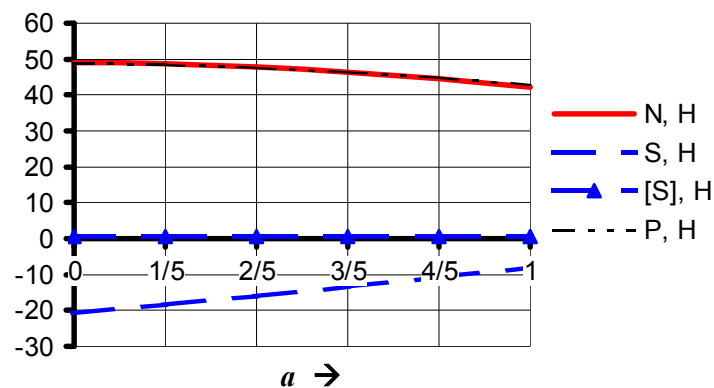


Рис. 2.16. Зміна реакцій в поперечному перерізі на краю

($R_k=0,2$ м; $L=0,31$ м; $a=0,35$ м; $h=0,15$ м; $[\sigma_p]=5$ кПа; $\varepsilon_p=1,0\%$; $C_{3ч}=35$ кПа; $k=50$ кПа; $\alpha_p=30^\circ$)

Вздовж крайньої просторової траєкторії ґрунтової частинки при русі поверхнею, де теоретично найбільша нерівномірність навантаження, зміна реакцій має майже лінійний характер, при $\alpha_p=0^\circ$ максимальне зростання dN по дузі l становить лише 3,9%; при $\alpha_p=30^\circ$ зростання становить 13,3% (рис. 2.16).

Навантаження ґрунтового шару має на початку поверхні значну нерівномірність і вирівнюється в кінцевому напрямку. Ґрунтовий шар руйнується в основному за рахунок нормальних зусиль.

Користуючись рівняннями силової взаємодії (2.40) та схемою на

рис. 2.8. отримано принципний вигляд залежностей реакцій від основних параметрів поверхні. Для більшої візуалізації зміни нормальних та дотичних зусиль поверхнею зобразимо їх у просторовому вигляді (рис. 2.17.)

$$\begin{cases} V_n = N \cdot \cos\varphi + S \cdot \sin\varphi, \\ H_c = N \cdot \sin\varphi - S \cdot \cos\varphi; \end{cases}$$

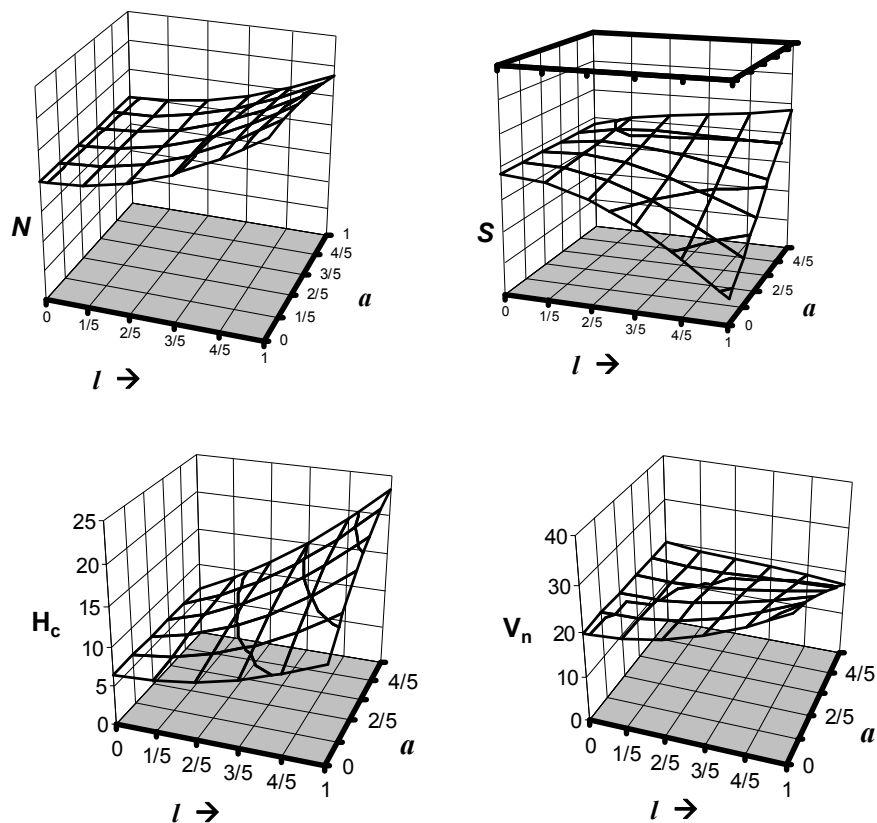


Рис. 2.17. Просторове поширення поверхнею нормальної N та дотичної S реакцій, стискаючої H_c та підйомної V_n реакцій поверхнею ($R_k=0,2$ м; $L=0,31$ м; $a=0,35$ м; $h=0,15$ м; $[\sigma_p]=5$ кПа; $\varepsilon_p=1,0\%$; $C_{3ч}=35$ кПа; $k=50$ кПа; $\alpha=15^\circ$)

Як видно з рис. 2.17. вздовж поверхні стискання поступово зростає внаслідок загортання пелюсток поверхні, а підйомна реакція поступово спадає. Внаслідок цього на кінці довгих поверхонь виникає можливість утворення важкопрохідної ґрунтової призми, що є небажаним. Звідки робимо висновок, що ефективнішим буде використання більш коротких поверхонь. Найбільш інтенсивну дію з боку поверхні ґрунт сприймає на пелюстках. Найбільш рівномірне навантаження в поперечному перерізі ґрунтова скиба отримує при куті нахилу до дна борозни $\alpha_p=15...30^\circ$.

2.4.2. Вертикальне зміщення лемешів кожного ярусу

Максимально можлива товщина обробітку ґрунту в кожному ярусі залежить від параметрів поверхні та фізико-механічних властивостей ґрунту. Для верхнього ярусу, який працює в орному шарі, вертикальне зміщення лемеша має відповідати заданій глибині основного обробітку ґрунту ($h_1=0...0,24$ м) і також може бути розраховане за нижче приведеною методикою.

На нижні яруси припадає робота в більш ущільнених шарах ґрунту переважно більш мінерального складу. Тому, обґрунтування вертикального зміщення лемеша в нижньому ярусі ґрунтується на забезпеченні достатніх деформаційних умов по всій висоті ґрунтової скиби.

В процесі подрібнення ґрунтової скиби згином дрібні частинки, які будуть при цьому утворюватися, будуть заповнювати наявні в ґрунті пори і внаслідок цього дуга верхнього краю поперечного перерізу ґрунтової скиби буде дещо більшого радіусу ніж нижнього краю. Це потрібно врахувати. Вважаємо, що в поточному поперечному перерізі, $R_{(x)}$ та $R_{I(x)}$ є, відповідно, мінімальним і максимальним радіусами дуг, які є достатніми для заданого діапазону подрібнення ґрунту (рис. 2.18.).

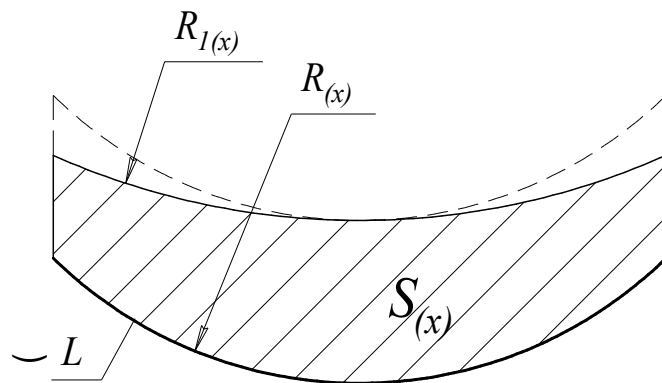


Рис. 2.18. Поточний поперечний переріз ґрунтового шару при русі поверхнею

В діапазоні рекомендованих значень поперечника структурного агрегату ґрунту для кореневмісних шарів крайні значення різняться приблизно в 2 рази (0,003...0,007 м; 0,005...0,010 м [36]). Тоді враховуючи пропорційну залежність радіуса поперечної кривизни від величини поперечника структурного агрегату

(2.19) можна записати зв'язок між $R_{(x)}$ та $R_{I(x)}$:

$$R_{I(x)} = 2 \cdot R_{(x)}. \quad (2.44)$$

Зміну ґрунтового об'єму можна врахувати через коефіцієнт пористості та параметри поверхні. Інтенсивне подрібнення ґрунтової скиби а отже і зміна об'єму, проходить в основному нижче нейтральної лінії поперечного перерізу.

$$V_0(1 - e_n) \frac{k_h}{k_h + 1} = \int_0^a S(x) dx; \quad (2.45)$$

де $V_0 = h_2 \cdot L \cdot a$ – об'єм ґрунту над поверхнею без змін; e_n – коефіцієнт пористості ґрунту: $e_n = (1 + 0,01 \cdot W\%) \rho_s / \rho_{zp} - 1$ (ρ_{zp} , ρ_s – відповідно, щільність ґрунту та його твердої фази); k_h – відношення зони розтягу до зони стиску при згині; $S_{(x)}$ – площа поперечного поточного поперечного перерізу:

$$S_{(x)} = 2 \cdot \int_0^{R_{(x)} \sin \frac{L}{2R_{(x)}}} [z_{1(y)} - z_{(y)}] dy$$

$z(y)$, $z_1(y)$ – функціональний запис дуги, яку утворює в поперечному перерізі відповідно верхній та нижній край ґрунтового шару.

Неявний запис інтегрального рівняння для знаходження максимально допустимої висоти ґрунтової скиби для нижнього ярусу h_2 .

$$h_2 L a (1 - e_n) = 2 \frac{k_h + 1}{k_h} \int_0^a \int_0^{R_{(x)} \sin \frac{L}{2R_{(x)}}} [z_1(y) - z(y)] dy dx. \quad (2.46)$$

Згідно до виразу (2.14) маємо: $z_{(y)} = R_{(x)} - \sqrt{R_{(x)}^2 - y^2}$, тоді:

$$z_{1(y)} = \frac{k_h h_2}{k_h + 1} + R_{1(x)} - \sqrt{R_{1(x)}^2 - y^2} = \frac{k_h h_2}{k_h + 1} + z_{0(y)}.$$

$$h_2 = \frac{k_h + 1}{k_h} \frac{2 \int_0^a \int_0^{R_{(x)} \sin \frac{L}{2R_{(x)}}} [z_0(y) - z(y)] dy dx}{aL(1 - e_n) - 2 \int_0^a \left(R_{(x)} \cdot \sin \frac{L}{2R_{(x)}} \right) dx} =$$

$$= \frac{k_h + 1}{k_h} \frac{2 \int_0^a \int_0^{R(x) \sin \frac{L}{2R(x)}} [R_{l(x)} - \sqrt{R_{l(x)}^2 - y^2} - R_{(x)} + \sqrt{R_{(x)}^2 - y^2}] dy dx}{aL(1 - e_n) - 2 \int_0^a \left(R_{(x)} \cdot \sin \frac{L}{2R_{(x)}} \right) dx} \quad (2.47)$$

Підінтегральні вирази у рівнянні (2.47) не є двократно інтегрованими звичайними методами. При підстановці виразів для $R_{(x)}$ та $R_{l(x)}$, для спрощення підінтегральних виразів користуємося залежністю (2.16) через малу значимість доданку l_k (п. 2.2.).

Для інтегрування виразів типу:

$$\int_0^{R(x) \sin \frac{L}{2R(x)}} \sqrt{R_{(x)}^2 - y^2} dy; \quad \text{та} \quad \int_0^a \left(R_{(x)} \cdot \sin \frac{L}{2R_{(x)}} \right) dx;$$

розкладемо їх в функціональні степеневі ряди (дод. Б.4.):

$f(y) = \frac{f^{(n)}(0)}{n!} y^n$, де $f^{(n)}(0)$ – значення похідної n -порядку в т. 0.

$$\begin{aligned} \sqrt{R_x^2 - y^2} &= R_x - \frac{y^2}{2R_x} - \frac{y^4}{8R_x^3} - \frac{y^6}{16R_x^5} - \frac{5y^8}{128R_x^7} - \dots = \\ &= R_x \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{R_x} \right)^2 - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(2n-3)!!}{(2n)!!} \left(\frac{y}{R_x} \right)^{2n} \right) \end{aligned} \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} R_x \sin \frac{L}{2R_x} &= \frac{aR_\kappa}{x} \cdot \left(\frac{Lx}{2aR_\kappa} - \frac{Lx^3}{2^3 3! a^3 R_\kappa^3} + \frac{L^5 x^5}{2^5 5! a^5 R_\kappa^5} - \frac{L^7 x^7}{2^7 7! a^7 R_\kappa^7} + \dots \right) = \\ &= \frac{L}{2} - \frac{L^3 x^2}{2^3 3! a^2 R_\kappa^2} + \frac{L^5 x^4}{2^5 5! a^4 R_\kappa^4} - \frac{L^7 x^6}{2^7 7! a^6 R_\kappa^6} + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n L^{2n+1}}{2^{2n+1} (2n+1)! a^{2n} R_\kappa^{2n}} x^{2n} \end{aligned} \quad (2.49)$$

Ряд (2.48) збіжний при $|y| < R_\kappa$, а ряд (2.49) на всій області значень функцій (дод. Б.1.).

Аналіз в середовищі *MathCAD Professional* показав, що для розрахунків, з достатньою точністю, можна використовувати перші п'ять членів розкладу (2.48) і три члени розкладу (2.49). В досліджуваній області даних ($a=0,25\dots0,5$ м; $L=0,25\dots0,4$ м; $R_\kappa=0,18\dots0,25$ м; $x=0\dots a$) найбільша похибка отримується при

$x=a$, $L \rightarrow \max$, $R_k \rightarrow \min$ і становить для першого розкладу – 5,7%, для другого – 0,05%, середні, відповідно 0,96% та 0,01%.

Тоді, з врахуванням розкладів (2.48), (2.49.) (дод. Б.2.)

$$2 \int_0^a \int_0^{R_{(x)} \sin \frac{L}{2R_{(x)}}} [R_{1(x)} - \sqrt{R_{1(x)}^2 - y^2} - R_{(x)} + \sqrt{R_{(x)}^2 - y^2}] dy dx =$$

$$= a \left(-1,04 \cdot 10^{-2} \frac{L^3}{R_k} - 3,1 \cdot 10^{-4} \frac{L^5}{R_k^3} - 1,44 \cdot 10^{-6} \frac{L^7}{R_k^5} - 3,6 \cdot 10^{-8} \frac{L^9}{R_k^7} \right). \quad (2.50)$$

$$2 \int_0^a \left(R_{(x)} \cdot \sin \frac{L}{2R_{(x)}} \right) dx = 2 \int_0^a \left(\frac{L}{2} - \frac{L^3 x^2}{2^3 3! a^2 R_k^2} + \frac{L^5 x^4}{2^5 5! a^4 R_k^4} \right) dx =$$

$$= La - \frac{L^3 a}{3 \cdot 2^2 3! R_k^2} + \frac{L^5 a}{4 \cdot 2^4 5! R_k^4} = a \left(L - 1,39 \cdot 10^{-2} \frac{L^3}{R_k^2} + 1,30 \cdot 10^{-4} \frac{L^5}{R_k^4} \right). \quad (2.51)$$

Підставимо отримані розв'язки інтегралів у вираз (2.47). Після спрощення отримаємо:

$$h = \frac{k_h + 1}{k_h} \frac{1,04 \cdot 10^{-2} \frac{L^2}{R_k} + 3,1 \cdot 10^{-4} \frac{L^4}{R_k^3} + 1,44 \cdot 10^{-6} \frac{L^6}{R_k^5} + 3,6 \cdot 10^{-8} \frac{L^8}{R_k^7}}{e_n - 1,39 \cdot 10^{-2} \frac{L^2}{R_k^2} + 1,30 \cdot 10^{-4} \frac{L^4}{R_k^4}} \quad (2.52)$$

Врахувавши (2.23) вираз (2.52) запишеться як:

$$h = \frac{k_h + 1}{k_h} \frac{R_k}{36,23 \cdot e_n - 1,22}, \quad (2.53)$$

З графічної залежності на рис. 2.19. побудованою за (2.53) видно, що на більш щільних ґрунтах глибина розробки нижнім ярусом є більшою.

Для забезпечення розпушення ґрунтової скиби визначену за виразом (2.53) необхідно врахувати силові фактори деформації ґрунтового шару. Відомо, що зусилля, прикладене до ґрунтового масиву, поступово втрачає свою інтенсивність при його дії в глибину масиву. Тому, глибина розробки залежить від зусилля, яке виникає в місцях дотику ґрунторозпушувальної поверхні з ґрунтом. Реакція поверхні на ґрунт повинна забезпечувати розпушення ґрунтової скиби на всю її висоту.

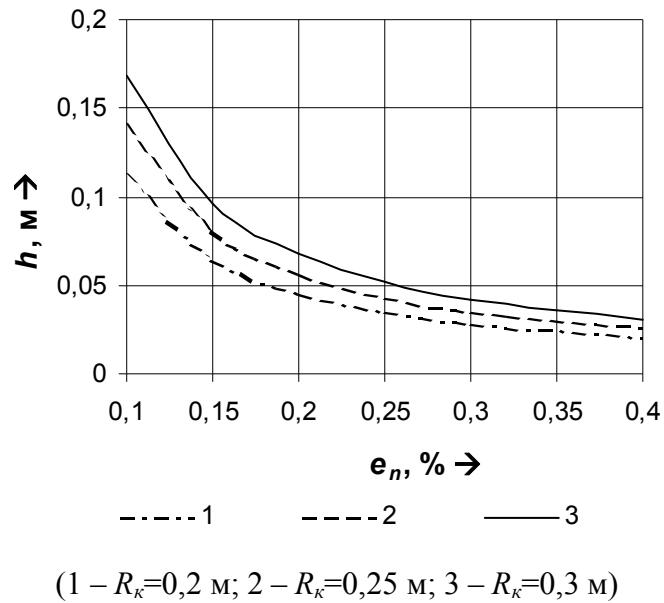


Рис. 2.19. Залежність глибини обробітку від пористості ґрунту

Умовою руйнування при згині [115] для отримання агрегатів величиною поперечника l_k буде:

$$\sigma_p = \frac{3M_k}{l_k^3} \left(1 + \frac{1}{k_h} \right) \geq [\sigma_p];$$

Виходячи з умови руйнування ґрунтового агрегату необхідно створити момент (рис. 2.20.):

$$M_k = l_k N_k = l_k (N \cos \varphi_1 + S \sin \varphi_1);$$

Так, як $\varphi_1 = l_k / R_k$ то, зважаючи на те, що l_k (0,005-0,010 м) порівняно з R_k (0,18-0,25 м) менше більше ніж на порядок, то $\varphi_1 \rightarrow 0$ і звідки $\sin \varphi_1 \rightarrow 0$, $\cos \varphi_1 \rightarrow 1$.

Тоді:

$$M_k \approx l_k N_k.$$

Нормальна реакція необхідна для утворення агрегату величиною l_k :

$$N_k = \frac{[\sigma_p] l_k^2}{3(1 + 1/k_h)}. \quad (2.54)$$

Відповідно до (рис. 2.15.), нормальна реакція, яка виникає на ґрунторозпушувальній поверхні, $N_n \approx P$. При цьому найменша за величиною реакція виникає посередині поперечного перерізу поверхні.

Звідки, при $\beta=90^\circ$, $\varphi_3=0^\circ$:

$$N_n = kh_2 l_k \sin \alpha_p. \quad (2.55)$$

Спад інтенсивності дії реакції в ґрунтовому шарі товщиною h_2 , враховується формулою Буссінеска [14]: $\sigma = \frac{3N_n}{2\pi h^2}$, а напруга, яка виникає на підшві агрегату при руйнуванні: $\sigma = N_k / l_k^2$. Прирівнявши праві частини цих виразів з врахуванням (2.54) та (2.55), і провівши нескладні перетворення отримаємо вираз для визначення висоти ґрунтової скиби в нижньому ярусі:

$$h_2 = \frac{9kl_k(1+1/k_h)\sin\alpha_p}{2\pi[\sigma_p]}. \quad (2.56)$$

Користуючись (2.55) побудуємо графічні залежності для визначення h_2 (рис. 2.21.).

Вертикальне ярусне зміщення лемешів не залежить від дожини поверхні a та є залежним від ґрунтових умов в кожному ярусі. Рекомендована величина верхнього ярусу становить $h_1=0,15\dots 0,18$ м, для нижнього ярусу – $h_2=0,07-0,11$ м, що відповідає і доповнює попередні дані.

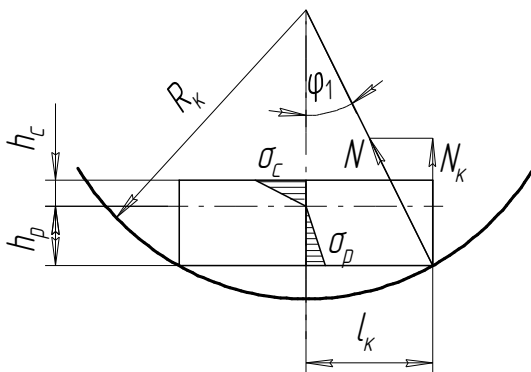


Рис. 2.20. Кінцевий етап руйнування ґрунтового шару в поперечному перерізі

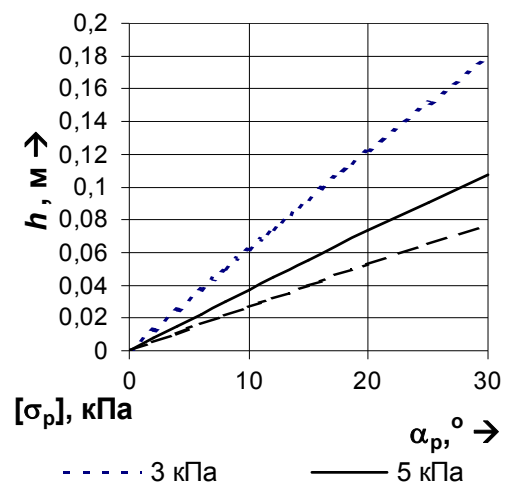


Рис. 2.21. Залежність товщини шару від кута встановлення поверхні на ґрунтах з різною міцністю на розтяг ($k=50$ кПа; $l_k=0,01$ м; $k_h=2$)

2.4.3. Горизонтальне зміщення лемешів нижніх ярусів

При ярусній конструкції глибокорозпушувача леміш нижнього ярусу є зміщеним назад в площині руху [42]. При цьому поверхня сколу ґрунту в нижньому ярусі повинна повністю знаходитися за лемешем верхнього ярусу. Положення поверхні сколу характеризується кутом сколу в нижньому ярусі ψ_2 та вистою нижнього ярусу h_2 (рис. 2.12.).

Вважаємо, що скол проходить в момент досягнення критичних напружень в об'ємі ґрунту який зминається лемешем нижнього ярусу.

Результуюче від нормального тиску на ґрунт зусилля дорівнює:

$$N_{зм} = q \cdot V. \quad (2.57)$$

де q – коефіцієнт об'ємного зм'яття ґрунту; V – об'єм ґрунту, що зминається. За даними попередніх досліджень [140], коефіцієнт q залежить від швидкості дії деформатора на ґрунт, і треба використовувати коефіцієнт q_V , який визначається наступною залежністю:

$$q_V = q + 5,3 V_{aep};$$

для $q = 120 \dots 150 \text{ Н/см}^3$.

Зусилля тертя відхиляє результуючу $R_{зм}$ на кут зовнішнього тертя μ :

$$R_{зм} = \frac{q_V V}{\cos \mu}.$$

З рис. 2.12., враховуючи ширину лемеша L , об'єм ґрунту, що зминається:

$$V = \frac{s^2 L \operatorname{tg} \alpha_p \operatorname{tg} \psi}{2(\operatorname{tg} \alpha_p + \operatorname{tg} \psi)},$$

де s – шлях зминання ґрунту.

Тоді:

$$R_{зм} = \frac{(q + 5,3 \cdot V_{aep}) s^2 L \operatorname{tg} \alpha_p \operatorname{tg} \psi}{\cos \mu \cdot 2(\operatorname{tg} \alpha_p + \operatorname{tg} \psi)}. \quad (2.58)$$

З іншої сторони зусилля сколу можна визначити з умови граничного стану ґрунту в площині сколу. Для цього використаємо метод В.В.Соколовського на основі теорії Кулона-Мора. Згідно цього умова граничного стану запишеться в вигляді:

$$\max \{ |\tau_{zp}| - (\sigma_{zp} \operatorname{tg} \varphi_{zp} + C) \} = 0,$$

де τ_{zp} , σ_{zp} – відповідно, граничні дотичні та нормальні напруження; C – зчеплення ґрунту.

Напруження в точках граничного стану визначається системою трьох рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \rho, \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0, \\ \frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}{(\sigma_x + \sigma_y + 2C \operatorname{ctg} \varphi_{zp})^2} = \sin^2 \varphi_{zp}. \end{cases}$$

Нормальне напруження до поверхні сколу, яка нахилена під кутом ψ_2 до дна борозни і при $0 \leq \varphi_{zp} \leq \pi/2$ ($\psi = \pi/4 - \varphi/2$) [56], можна визначити з виразу:

$$\sigma_{zp} = \frac{\cos^2 \varphi}{1 - \sin \varphi} e^{\left(\frac{3\pi}{2} - 2\psi + \varphi\right)} \left(\frac{\gamma h_2}{2} + C \operatorname{ctg} \varphi_{zp} \right).$$

Зусилля граничної рівноваги:

$$Q_{zp} = \frac{\sigma_{zp} F_{ск}}{\cos \varphi_{zp}},$$

де $F_{ск}$ – площа сколу, яка складається з площі прямокутника з основою рівною ширині лемеша L , та двох площ частин конуса утворених з обох сторін лемеша.

При визначенні площі сколу $F_{ск}$, враховуючи перекриття діапазонів значень кутів повздовжнього і поперечного сколу [56, 72, 73], для спрощення математичного виразу, приймаємо їх однаковими:

$$F_{ск} = \frac{h}{\sin \psi} \left(\frac{\pi h}{2 \operatorname{tg} \psi} + L \right). \quad (2.59)$$

Прирівнявши між собою вирази для визначення зусилля граничної рівноваги та максимального зусилля зминання ґрунту, виразимо з отриманої рівності шлях зминання:

$$s = \sqrt{\frac{2 \cos \mu \frac{\cos^2 \varphi_{ep}}{1 - \sin \varphi_{ep}} e^{(\pi+2\varphi)} \left(\frac{\gamma h_2}{2} + C \operatorname{ctg} \varphi_{ep} \right)}{(q + 5,3V_{azp}) L \operatorname{tg} \alpha_p \cos \varphi_{ep}} \cdot \frac{h_2}{\sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_{ep}}{2}\right)} \left(\frac{\pi h_2}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_{ep}}{2}\right)} + L \right)}. \quad (2.60)$$

Горизонтальне рознесення ґрунторозпушувальних поверхонь базується на принципі вільного проходження ґрунту між ярусами без підпирання верхнього ярусу нижнім (d_{\min}) та уникнення контакту ґрунту в зоні активного подрібнення (d_{\max}), $d \in [d_{\min}; d_{\max}]$ (рис. 2.12.).

Для уникнення контакту ґрунту з верхнього та нижнього ярусів в зоні активного подрібнення необхідно, щоб падіння ґрунту верхнього ярусу проходило за кінцевим перерізом поверхні нижнього ярусу. Опираючись на кінематику руху частинок розпушеного ґрунтового шару, маємо:

$$d_{\max} = \frac{V_{azp} \cos \alpha_p}{2g} \left(V_{azp} \sin \alpha_p + \sqrt{2ga \sin \alpha_p + (V_{azp} \sin \alpha_p)^2} \right); \quad (2.61)$$

При розгляді горизонтального зміщення з позицій зони сколу, враховуючи шлях зминання ґрунту без утворення сколу:

$$d_{\min} = \frac{h_2}{\operatorname{tg} \psi_2} - s = \frac{h_2}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_{ep}}{2}\right)} - s. \quad (2.62)$$

Горизонтальне зміщення лемешів нижнього ярусу відносно верхнього залежить від швидкості руху розпушувача. При $V_{azp}=1,5$ м/с – $d=0,11-0,14$ м, $V_{azp}=2,5$ м/с – $d=0,11-0,33$ м.

2.5. Визначення тягового опору ґрунторозпушувальної поверхні

Для визначення раціонального класу тяги енергетичного засобу необхідно визначити тяговий опір робочого органа глибокорозпушувача. Тяговий опір ґрунторозпушувальної поверхні визначаємо з врахуванням просторової взаємодії частинок ґрунтового шару з поверхнею (P_n) та тягового зусилля на різання ріжучою кромкою поверхні (P_p), для визначення якого використовуємо другий член раціональної формули В.П.Горячкіна, рекомендованої для

плугів.

Тягове зусилля переміщення поверхні:

$$P_T = P_p + P_n.$$

Складова від зусилля розробки ґрунту P_p визначається поперечним перерізом ґрунтового шару:

$$P_p = k \cdot L \cdot h.$$

Складову від деформування ґрунту на поверхні визначаємо за рівняннями силової взаємодії (2.40.).

Для визначення впливу інерційного навантаження ґрунтового шару при русі поверхнею, спочатку розглянемо співвідношення шляхів руху ґрунтового шару дугою поперечного перерізу l_ε поверхні до руху вздовж поверхні l_a .

Знайдемо максимальне відношення l_ε/l_a :

$$\max\left(\frac{l_\varepsilon}{l_a}\right) = \frac{\varepsilon_{p \max} L_{\max}}{2a_{\min}} 100\% = \frac{0,03 \cdot 0,2}{0,3} 100\% = 2\%.$$

Як видно, поперечне зміщення максимально може становити лише 2% від повздовжнього, тому бічним зусиллям dS при визначенні тягового опору можна нехтувати.

На поверхнях такого типу, в кожній точці поперечного перерізу виникає горизонтальний опір від транспортування ґрунту поверхнею (P_{n1}) та стиску країв ґрунтового шару пелюстками поверхні (P_{n2}) (рис.):

$$P_n = P_{n1} + P_{n2} = \int_{F_{нов}} dP_{n1} + 2[\sigma_c] F_c;$$

де $[\sigma_c]$ – граничні напруження стиску ґрунту, F_c – поперечна проекція площі стиску ґрунтового шару на пелюстках поверхні (рис. 2.22.).

$$F_c = \frac{R_\kappa}{2} \left(\cos \frac{\pi}{4} - \cos \varphi \right) \left[R_\kappa \left(\sin \varphi - \sin \frac{\pi}{4} \right) + \left(\frac{L}{2} - R_\kappa \sin \varphi \right) \left(1 - \frac{1 - \cos(\pi/4)}{1 - \cos \varphi} \right) \right].$$

Тяговий опір всієї поверхні від транспортування ґрунту:

$$dP_{n1} = \frac{f \cdot dN}{\cos \alpha \cdot \sin \beta} = \frac{f}{\cos \alpha \cdot \sin \beta} \cdot (dG \cos \varphi + dF_{n1} \sin(\varphi - \varphi_3)) =$$

$$= \frac{f}{\cos \alpha \cdot \sin \beta} \cdot (dG \cos \varphi + \frac{dG \cdot V_{azp}^2}{g \cdot \rho} \sin(\varphi - \varphi_3)).$$

$$P_{n1} = \int_{F_{ноє}} dP_{n1} = \frac{2fG}{\cos \alpha} \int_0^{\frac{L}{2}} \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{1}{\sin \beta} (\cos \varphi + \frac{V_{azp}^2}{g \cdot \rho} \sin(\varphi - \varphi_3)) dldx. \quad (2.63)$$

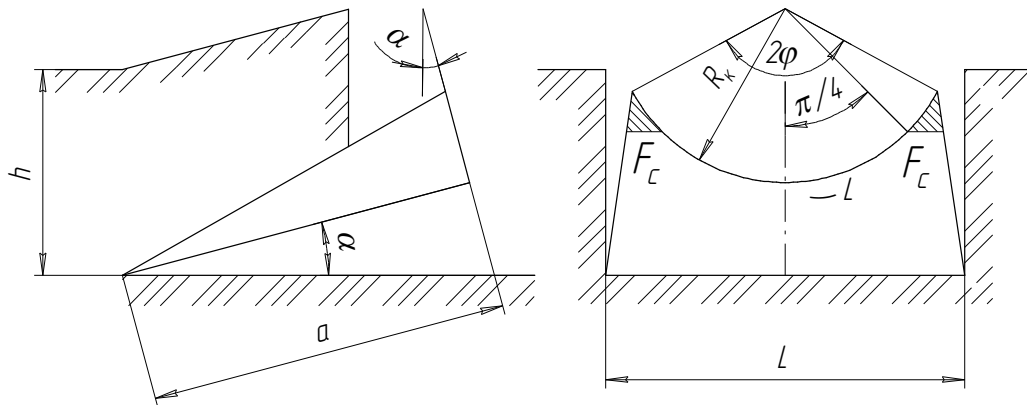


Рис. 2.22. Схема до визначення тягового опору поверхні

Даний інтеграл не розв'язується відомими табличними методами через складні тригонометричні залежності аргументів. Для спрощення підінтегральних виразів використовуємо лінійну інтерполяцію функції методом вузлових точок та метод найменших квадратів.

Найбільш складними для інтегрування є:

$$f_1(\varphi) = \varphi_3 = \arcsin \frac{1 - \cos \varphi}{0,702\varphi}; \quad f_2(\varphi) = \sin(\varphi - \varphi_3).$$

Виконуємо спрощення підінтегрального виразу використовуючи метод лінійної інтерполяції через вузлові точки [132].

Зобразимо графічно залежності $f_1(\varphi)$ та $f_2(\varphi)$ в діапазоні даних $\varphi \in [0; \frac{\pi}{2}]$ (рис. 2.23), який відповідає максимально можливій ширині захвату поверхні. Можливою є лінійна інтерполяція методом вузлових точок.

В результаті лінійної інтерполяції (дод. Б.3.) отримаємо залежності типу:

$$f_1(\varphi) = k_1 \cdot \varphi; \quad \text{та} \quad f_2(\varphi) = k_2 \cdot \varphi. \quad (2.64)$$

де коефіцієнти пропорційності: $k_1 = 0,7231$; $k_2 = 0,2683$.

Максимальні відхилення становлять 1,52% та 6,72%, для $f_1(\varphi)$ та $f_2(\varphi)$, відповідно (табл. Б.1).

Згідно до (2.30) з врахуванням (2.64) отримаємо:

$$\rho_l = 0,702 \cdot l + \frac{a^2 R_x^2}{0,367 \cdot l^3} = \frac{0,258 \cdot l^4 + a^2 R_x^2}{0,367 \cdot l^3}. \quad (2.65)$$

Згідно з рис. 2.24., при можливих параметрах поверхні $\sin\beta \approx 1$.

Тоді, з врахуванням інтерполяцій (2.64) вираз (2.63) матиме вигляд:

$$P_{n1} = \frac{2f \cdot G}{\cos\alpha} \int_0^{\frac{L}{2}} \int_0^{\frac{L}{2}} \left(\cos \frac{l}{R_{(x)}} + \frac{0,2683 \cdot V_{azp}^2}{g \cdot \rho_l} \frac{l}{R_{(x)}} \right) dl dx. \quad (2.66)$$

Здійснимо підстановці виразу для $R_{(x)}$ використовуємо вираз (2.16).

Проводимо інтегруємо спочатку по зовнішніх межах:

$$\begin{aligned} P_{n1} &= \frac{2f \cdot G}{\cos\alpha} \int_0^{\frac{L}{2}} \int_0^{\frac{L}{2}} \left(\cos \frac{l \cdot x}{aR_k} + \frac{0,2683 \cdot V_{azp}^2}{g \cdot \rho_l} \frac{l \cdot x}{aR_k} \right) dl dx = \\ &= \frac{2a \cdot f \cdot G}{\cos\alpha} \int_0^{\frac{L}{2}} \left(\frac{R_k}{l} \sin \frac{l}{R_k} + \frac{0,1342 \cdot V_{azp}^2}{g \cdot R_k} \frac{l}{\rho_l} \right) dl \end{aligned}$$

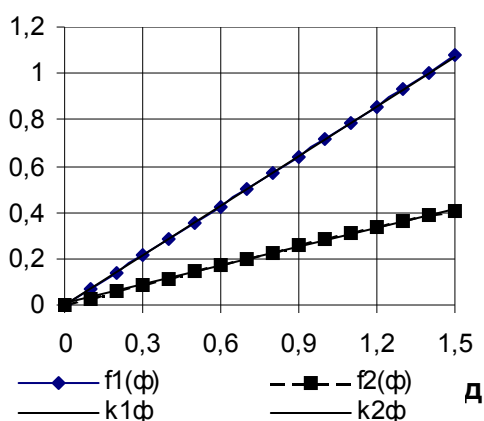
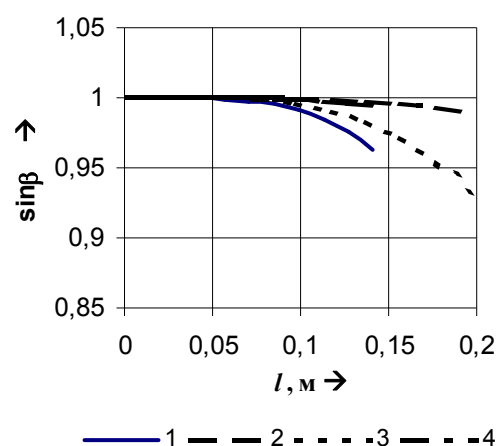


Рис. 2.23. Графічне зображення можливості лінійної інтерполяції



1 – $a=0,2$ м, $R_k=0,18$ м; 2 – $a=0,5$ м, $R_k=0,18$ м;
3 – $a=0,2$ м, $R_k=0,25$ м; 4 – $a=0,5$ м, $R_k=0,25$ м.

Рис. 2.24. До спрощення виразу F_T

З врахуванням (2.65):

$$P_{n1} = \frac{2a \cdot f \cdot G}{\cos \alpha} \int_0^L \left(\frac{R_k}{l} \sin \frac{l}{R_k} + \frac{0,1342 \cdot V_{azp}^2}{g \cdot R_k} \frac{0,367 \cdot l^4}{0,258 \cdot l^4 + a^2 R_k^2} \right) dl$$

Для розв'язку інтегралу інтерполюємо функцію $\sin(l/R_k)$ методом найменших квадратів [23] в межах $(l/R_k) \in [0; \pi/2]$ (дод. Б.3.).

$$\sin \frac{l}{R_k} \approx 1,195 \frac{l}{R_k} - 0,337 \left(\frac{l}{R_k} \right)^2 - 0,024 \quad (2.67)$$

Максимальне відхилення становить 2,96% (табл. Б.2).

$$\begin{aligned} P_{n1} &= \frac{2a \cdot f \cdot G}{\cos \alpha} \int_0^L \left(1,195 - 0,337 \frac{l}{R_k} - 0,024 \frac{R_k}{l} + \frac{0,1342 \cdot V_{azp}^2}{g \cdot R_k} \frac{0,367 \cdot l^4}{0,258 \cdot l^4 + a^2 R_k^2} \right) dl = \\ &= \frac{a^2 \cdot f \cdot \gamma \cdot h \cdot L}{\cos \alpha} \left[0,598L - 0,042 \frac{L^2}{R_k} - 0,149R_k - 0,024R_k + \right. \\ &+ \frac{0,134V_{azp}^2}{g \cdot R_k} (0,711L - 0,353\sqrt{aR_k} \ln \left(\frac{1020aR_k + 129L^2 - 512L\sqrt{aR_k}}{1020aR_k + 129L^2 + 512L\sqrt{aR_k}} \right) - \\ &\left. - 0,706\sqrt{aR_k} \left(\arctg \left(\frac{0,508L}{\sqrt{aR_k}} + 1 \right) + \arctg \left(\frac{0,508L}{\sqrt{aR_k}} - 1 \right) \right) \right]. \end{aligned}$$

Враховуючи (2.23):

$$\begin{aligned} P_{n1} &= \frac{a^2 \cdot f \cdot \gamma \cdot h}{\cos \alpha} \left[0,662R_k + \right. \\ &+ \frac{0,134V_{azp}^2}{g \cdot R_k} (1,12R_k - 0,353\sqrt{aR_k} \ln \left(\frac{1020aR_k + 318R_k^2 - 804R_k\sqrt{aR_k}}{1020aR_k + 318R_k^2 + 804R_k\sqrt{aR_k}} \right) - \\ &\left. - 0,706\sqrt{aR_k} \left(\arctg \left(\frac{0,8R_k}{\sqrt{aR_k}} + 1 \right) + \arctg \left(\frac{0,8R_k}{\sqrt{aR_k}} - 1 \right) \right) \right]. \quad (2.68) \end{aligned}$$

Отриманий вираз (2.68) є дуже складним для подальшого застосування. Якщо зобразити графічну залежність коефіцієнта біля V_{azp}^2 від a та R_k , то можна побачити, що він майже не змінюється (в межах $R_k=0,18-0,25$ м; $a=0,25-0,5$ м) і становить 0,0074-0,0080 (рис. 2.25.). З точністю до 0,001 приймаємо значення $k_V=0,008$.

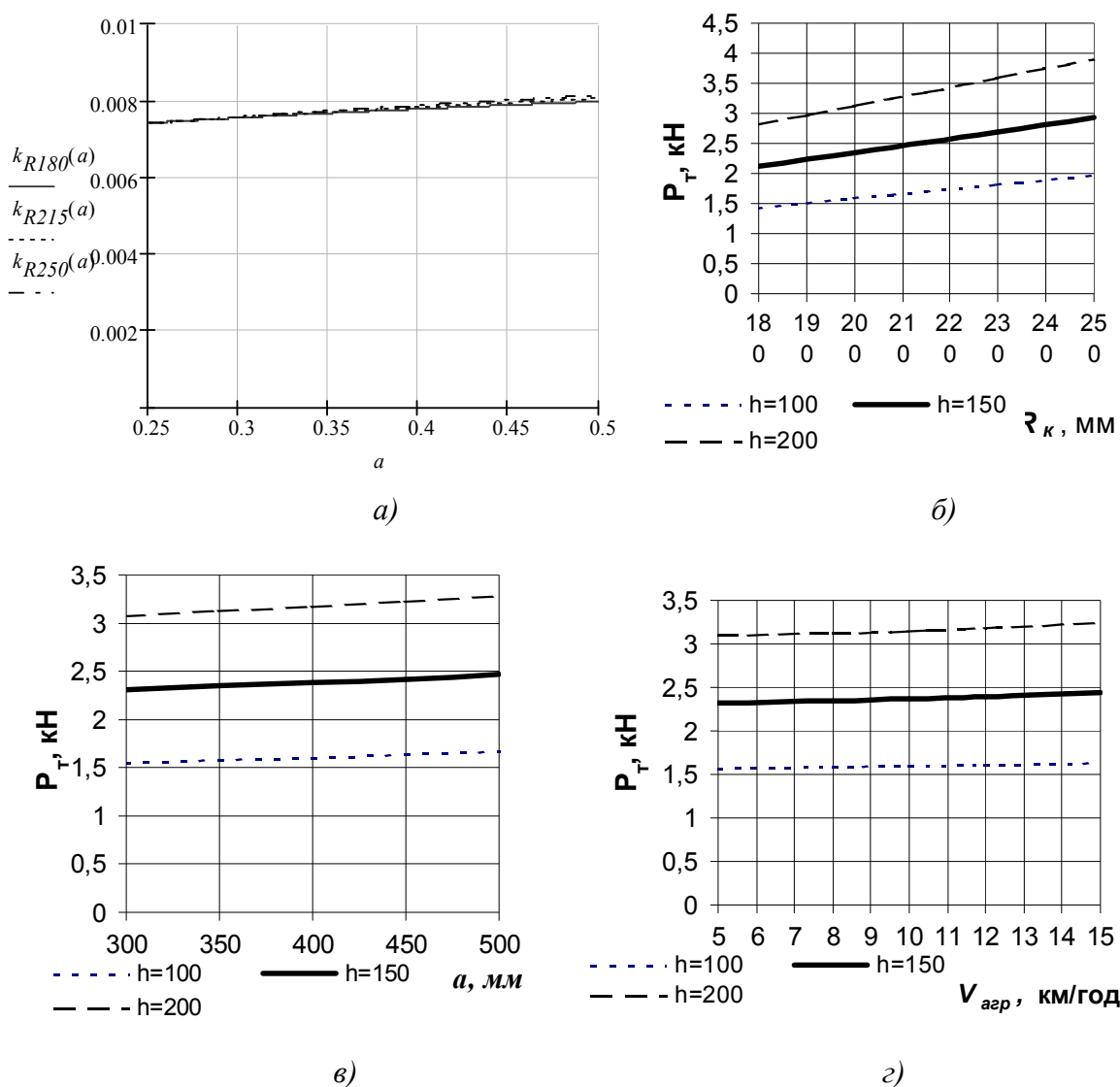
Тоді, вираз (2.68) набуде вигляду:

$$P_{n1} = \frac{a^2 \cdot f \cdot \gamma \cdot h}{\cos \alpha} [R_k^2 (0,542 - 0,038 \ln(1,571 R_k)) + 0,008 V_{agr}^2] \quad (2.69)$$

Повний тяговий опір ґрунторозпушувальної поверхні без врахування опору стійок та типу навіски:

$$P_T = khL + \frac{a^2 \cdot f \cdot \gamma \cdot h}{\cos \alpha} [R_k^2 (0,542 - 0,038 \ln(1,571 R_k)) + 0,008 V_{agr}^2] + 2[\sigma_c] F_c \quad (2.70)$$

Зобразимо залежності зміни тягового опору поверхні від основних її параметрів (рис. 2.25.) (ширина поверхонь є змінною і залежною від радіуса R_k).



б) – $a=0,35$ м; $\alpha=15^\circ$; $k=45$ кПа; $\gamma=1,75$ г/см³; $V_{agr}=8$ км/год; в) – $R_k=0,2$ м; $\alpha=15^\circ$; $k=45$ кПа; $\gamma=1,75$ г/см³; $V_{agr}=8$ км/год; з) – $R_k=0,2$ м; $a=0,35$ м; $\alpha=15^\circ$; $k=45$ кПа; $\gamma=1,75$ г/см³.

Рис. 2.25. Тяговий опір ґрунторозпушувальної поверхні

Основною складовою тягового опору є зусилля розробки ґрунтового середовища P_p , яке складає біля 80-85%. Максимальний тяговий опір однієї ґрунторозпушувальної поверхні без врахування опору стійок згідно до рис. 2.25. становить до 4,0 кН.

2.5. Висновки до розділу

- Ґрунтова скиба розглядається як однорідне за щільністю суцільне середовище. В якості теорії міцності, прийнята до уваги теорія Кулона-Мора, як для середовища, яке чинить різний опір деформаціям стиску та розтягу.
- Ґрунторозпушувальна поверхня утворюється сукупністю поперечних перерізів у вигляді дуг кіл однакової довжини. При русі поверхнею кожна точка ґрунтової скиби при згині описує у просторі траєкторію, яка лежить на поверхні уявного циліндра. Швидкості руху мають бути сталими.
- Форма ґрунторозпушувальної поверхні описується виразами (2.15) та (2.17). Найбільш вагомими параметрами, що визначають форму, є довжина та кінцевий поперечний радіус поверхні. При складності виготовлення поверхні, на практиці її можна замінити розглянутими наближеними поверхнями, які створені на основі відомих лінійчатих і розгортних форм. Повздожні твірні форми запропонованої ґрунторозпушувальної поверхні наближаються до прямих ліній при збільшенні величини радіуса кінцевого поперечного перерізу.
- Радіус кривизни поверхні вздовж руху є більш ніж в 10 разів більший ніж в поперечному перерізі, на підставі чого, для спрощення розрахунків, в основному розглядається плоский згин ґрунтової скиби в поперечному перерізі
- Кінцевий радіус поперечної кривизни повинен становити для підорних шарів $R_k=0,25-0,41$ м, для орних – $R_k=0,13-0,21$ м для розпушення ґрунтів ($l_k=5...7$ мм) із найпоширенішими характеристиками ($\sigma_{kp}=3...7$ кПа,

$\varepsilon_p=1...2\%$). Це відповідає і доповнює дані попередніх досліджень, що підтверджує правильність вибору схеми і передумов подрібнення ґрунтової скиби згином.

- Ширина захвату поверхні не залежить від величини силових факторів і є пропорційною радіусу кривизни кінцевого поперечного перерізу R_k . Для орного шару у порівнянні з підорними шарами ширина захвату зменшується. Ширина поверхні для підорних шарів $L=0,39...0,61$ м, для орних – $L=0,20-0,33$ м.
- Довші поверхні є більш лінійчатиими ніж коротші, тому сприяють легшому проходженню ґрунту поверхнею. В відносно довгих поверхнях ($a>0,25$ м для орного шару, $a>0,43$ м для підорних шарів) переважає в основному двоплощинне руйнування, а в більш коротких – триплощинне. Збільшення швидкості руху та підвищення зв'язності ґрунту призводить до подовження поверхні.
- Найбільш інтенсивну дію з боку поверхні скиба ґрунту сприймає на пелюстках поверхні. Найбільш рівномірне навантаження в поперечному перерізі на всій довжині поверхні ґрунтова скиба отримує при куті встановлення її до дна борозни $\alpha_p=25...30^\circ$.
- Вертикальне зміщення лемешів суміжних ярусів залежить від ґрунтових умов в кожному ярусі. Рекомендована величина глибини обробітку у верхньому ярусі становить $h_1=0,15...0,18$ м, у нижньому ярусі – $h_2=0,07-0,11$ м, що відповідає і доповнює дані попередніх досліджень.
- Горизонтальне зміщення лемешів нижнього ярусу відносно верхнього залежить від швидкості руху розпушувача та фізико-механічних властивостей ґрунтового середовища в кожному ярусі. При $V_{agr}=1,5$ м/с – $d=0,11-0,14$ м, $V_{agr}=2,5$ м/с – $d=0,11-0,33$ м.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження проводились з метою перевірки теоретичних положень врахування стану ґрунту в параметрах ґрунторозпушувальної поверхні, визначення впливу основних параметрів ґрунторозпушувальних поверхонь на показники розпушення ґрунту, оцінки ефективності роботи запропонованого глибокорозпушувача.

3.1. Програма експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження містили лабораторні та лабораторно-польові дослідження, польові випробування.

3.1.1. Лабораторні дослідження

Проводились дослідження впливу основних фізичних характеристик ґрунту (складу, вологості, щільності) на характеристики переважаючих видів деформацій (згин та розтяг) при даному способі розпушення; перевірки прийнятого механізму подрібнення ґрунтової скиби; дослідження впливу основних конструктивних та технологічних параметрів на кількісні та якісні показники розпушення (вплив глибини розробки та величини кінцевого поперечного радіуса поверхні на тягове зусилля та структуру розпушеного ґрунту); порівняння дослідних даних з теоретичними.

3.1.2. Лабораторно-польові дослідження та польові випробування

Проводились дослідження впливу відносної вологості ґрунту та параметрів робочих органів на якість розпушення ґрунту, а саме: наявності опорного колеса, просторового взаємного розташування робочих поверхонь і їх конструктивних параметрів. Визначено тяговий опір робочого органа при різних ґрунтових умовах.

3.2. Характеристика об'єктів дослідження

Об'єктом досліджень були два дослідні зразки ярусного глибокорозпушувача та ґрунторозпушувальні поверхні. Експериментальні дослідження

проводились на дослідному полігоні Вінницької області, ґрунтові умови, характерні для об'єктів дослідження, наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Характеристики ґрунтових умов польових випробувань

№	Місце проведення	Тип ґрунту	$C_{уд}$	Горизонти ґрунту, м							
				0...0,1		0,1...0,2		0,2...0,3		0,3...0,4	
				W, %	ρ , г/см ³	W, %	ρ , г/см ³	W, %	ρ , г/см ³	W, %	ρ , г/см ³
1	Полігон 1	супісок напівтвердий	3-8	19,8	1,50	21,8	1,58	23,3	1,72	24,5	1,80
2	Полігон 2	супісок легкий	3-6	11,9	1,41	12,9	1,44	14,2	1,46	15,1	1,48
3	Полігон 3	суглинок легкий	4-7	14,2	1,43	16,4	1,48	17,5	1,51	18,3	1,56

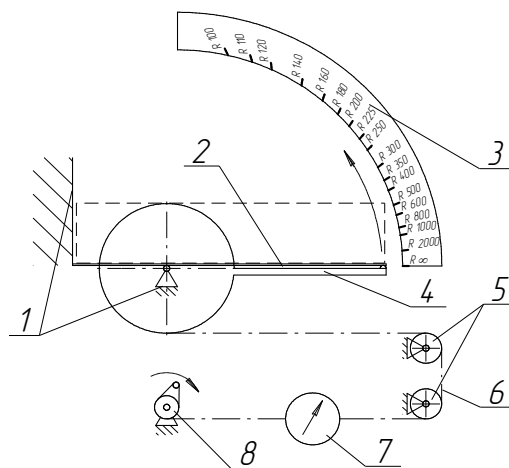
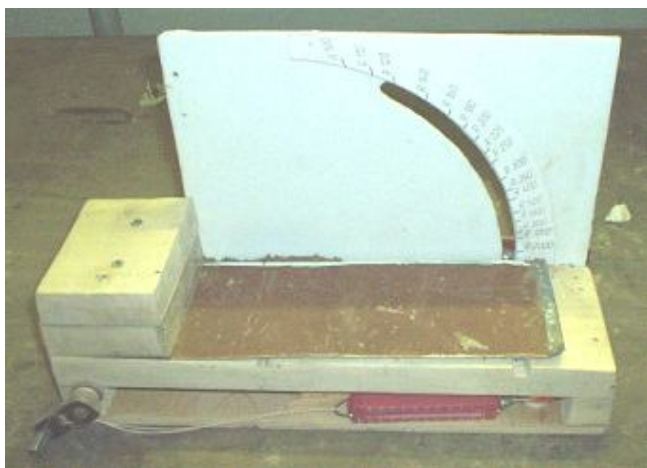
Ґрунтові умови дослідних об'єктів вибирались з тих міркувань, що сільськогосподарські глибокорозпушувачі працюють у ґрунтах I–III категорії, які складають переважну більшість ґрунтового агрофону України [43].

3.3. Опис експериментальних установок, які застосовуються для лабораторних і польових досліджень

3.3.1. Пристосування для дослідження параметрів згину ґрунтової скиби

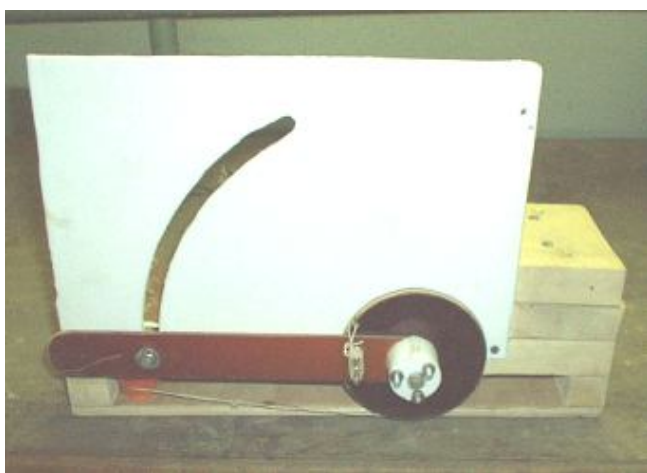
При згині ґрунтової скиби нейтральна лінія зміщується в сторону стиску. Від величини зміщення залежить ефективність розпушення ґрунту згином.

Принцип роботи полягає в наступному (рис. 3.1.). Зусилля, яке створюється натяжним барабаном 8, відображається пружинним динамометром 7 та передається через нерозтяжну нитку 6 та блоки 5 на важіль 4. Консоль важеля 4 діє на вільний кінець гнучкої пружної пластини 2, на якій знаходиться дослідний ґрунтовий зразок. Один кінець пластини жорстко закріплений, і пластина, поступово загинаючись, передає деформацію згину на ґрунтовий зразок.



б) – кінематична схема

1 – каркас; 2 – гнучка стальна пластина; 3 – екран зі шкалою; 4 – важіль з консоллю, 5 – блоки, 6 – умовно нерозтяжна в даних умовах нитка, 7 – пружинний динамометр; 8 – натяжний барабан.



а) – загальний вигляд

Рис. 3.1. Пристосування для дослідження згину ґрунтової скиби.

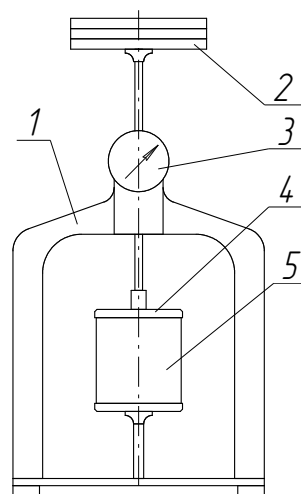


Рис. 3.2. Пристрій для вимірювання відносних деформацій ґрунту:

1 – пластометр, 2 – вантаж, 3 – індикатор, 4 – штамп, 5 – зразок.

3.3.2. Пристрій для дослідження деформаційних властивостей розтягу ґрунтового зразка

При згині ґрунтової скиби, 63-82% її об'єму працює на розрив.

Дослідження зразків проводилися на основі стандартизованого приладу – пластометра (рис. 3.2.). Додатково, згідно вибраної методики, було виготовлено два циліндричні штампи.

3.3.3. Ґрунтовий канал з динамометричним візком

Ґрунтовий канал кафедри БДММіО НУВГП представляє собою бетоновану місткість прямокутного перерізу з розмірами 9,2×1,8×1,5 м, заповнену розпушеним і ущільненим ґрунтом. Верхньою площиною вертикальних бетонних стінок каналу прокладені рейки, якими рухається динамометричний візок з дослідним робочим обладнанням.

Загальний вигляд ґрунтового каналу і кінематична схема приводу динамометричного візка представлені на рис. 3.3. і 3.4.

Динамометричний візок 11 пересувається за допомогою трособлокового механізму під дією тягового зусилля, яке створюється барабаном 19 лебідки. Крутний момент на барабан 19 передається від електродвигуна 3 через ланцюгову передачу 5 на вхідний вал ходозменшувача 4, коробку зміни передач 2, задній міст 1 трактора ДТ-75Б. На вхідному валу правого бортового редуктора встановлена зірочка ланцюгової передачі 20 приводу барабана 19 лебідки. Трос 18 трособлокового механізму одним кінцем закріплюється до ручної лебідки 6, пропускається через направляючі блоки візка 9, 17, барабан 19, нерухомий блок 15, направляючі блоки візка 16, 12. Інший кінець тросу 18 закріплюється до динамометра-тензоперетворювача другого класу точності (ДПУ-2-2) 13, який з'єднаний з нерухомою опорою 14. Візок зварної конструкції 11 опирається на чотири котки 10 з ребордами і рухається рейками 7 вздовж каналу 8.

На рамі візка (рис. 3.5.) встановлені паралельно два стояки з ґрунторозпушувальними поверхнями з можливістю регулювання глибини та кута різання.

Для дослідження впливу величини кінцевого радіуса поверхонь та їх їх конструкції, було виготовлено декілька дослідних зразків поверхонь (рис. 3.6.).



Рис. 3.3. Загальний вигляд ґрунтового каналу з динамометричним візком.

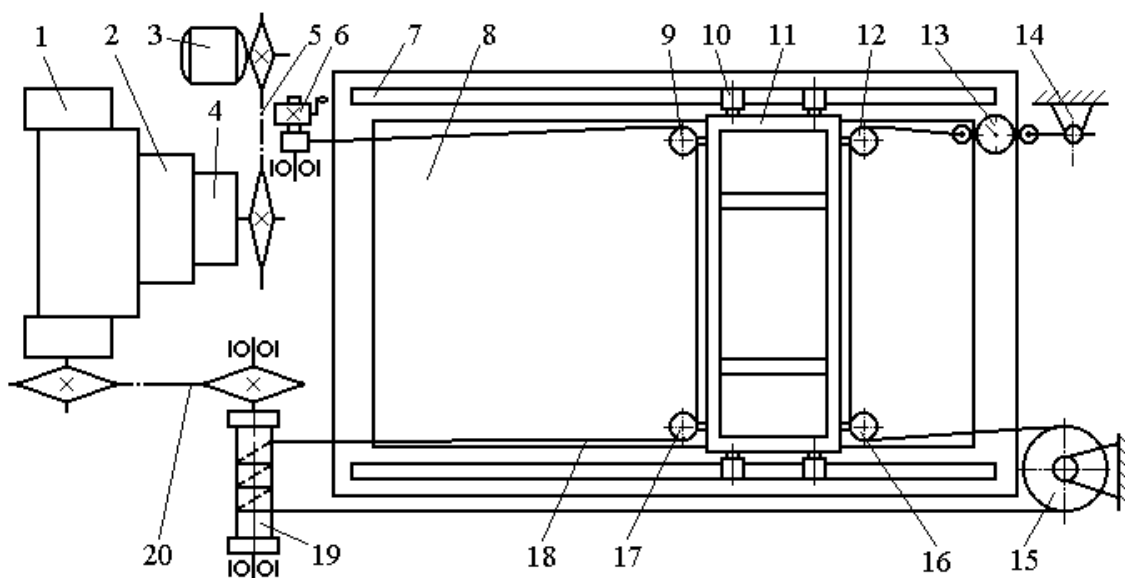


Рис. 3.4. Кінематична схема приводу динамометричного візка:

1 - задній міст трактора; 2 - коробка зміни передач; 3 - електродвигун; 4 - ходозменшувач; 5, 20 - ланцюгові передачі; 6 - лебідка попереднього натягування троса; 7 - рейкова колія; 8 - ґрунтовий канал; 9, 12, 15, 16, 17 - направляючі блоки; 10 - ходові котки; 11 - візок; 13 - динамометр-тензоперетворювач; 14 - опора; 18 - тяговий трос; 19 - барабан.

Для наступного якісного аналізу процесу при проведенні досліджень використовувалися цифрова відеокамера JVC GR-DVL9700 та цифрова фотокамера Mustek G-Smart mini 2.



Рис. 3.5. Навіска дослідного обладнання на динамометричний візок



Рис. 3.6. Змінні дослідні ґрунторозпшувальні поверхні.

3.3.4. Тракторний агрегат для польових випробувань

Дослідження глибокорозпшувачів проводилися на базі гусеничних тра-

кторів ДТ-75 та Т-130. Робочі органи виконані тристояковими двоярусними. Для дослідження впливу розміщення стояків на рамі, необхідності додаткової обробки задернованого шару, наявності опорного колеса, виявлення переваг роботи глибокорозпушувача нової конструкції з глибокорозпушувачем попередньої конструкції [108], було виконано два дослідних зразки з V- та δ -подібним виконанням несучої рами (рис. 3.7.).



а) – V-подібне виконання;



б) – Δ -подібне виконання

Рис. 3.7. Загальний вигляд робочих органів ярусного глибокорозпушувача

Варіант (а) має V-подібне розміщення стояків на несучій рамі. В стояках відсутнє перекриття робочих поверхонь в ярусах в напрямку руху. ґрунт, що розробляється, сприймає поперечний згин та стиск. Для регулювання заглиблення та стабільності руху змонтоване опорне колесо.

Варіант (б) має Δ -подібне розміщення стояків на несучій рамі. В стояках відсутнє перекриття робочих поверхонь в ярусах в напрямку руху. ґрунт, що розробляється, сприймає тільки поперечний згин без стиску. Перед робочими поверхнями у верхньому ярусі встановлені вертикальні розрізні ножі.

Конструктивно найближчий двохярусний тристояковий глибокорозпушувач має Δ -подібне розміщення стояків на несучій рамі. В стояках присутнє перекриття робочих поверхонь в ярусах в напрямку руху на $\frac{1}{3}$ довжини поверхні. ґрунт, що розробляється, сприймає поперечний згин та стиск.

3.4. Вивчення впливу фізичних характеристик ґрунту на співвідношення висоти зони розтягу до зони стиску при згині ґрунтової скиби

Дослідження проводились з допомогою спеціально виготовленого пристосування (п. 3.3.1.). Для отримання однорідних за щільністю та вологістю зразків та дотримання точності розмірів, зразки виготовлялися штучно у спеціально підготовлених формах. У форму засипався з невеликим надлишком одразу весь об'єм ґрунту, ущільнювався, надлишок ґрунту зрізався. Природні ґрунтові зразки непорушеної структури було важко отримати, внаслідок відносно невеликих розмірів. Всі зразки готували однакових розмірів.

Габаритні розміри призматичних ґрунтових зразків вибиралися з наступних міркувань:

- довжина зразка L , внаслідок симетричності ґрунторозпушувальної поверхні, дорівнює половині ширини робочої поверхні розпушувача ($L=0,2$ м);
- ширина зразка відповідає величині сколу ґрунтової стружки на лемеші, згідно раніше проведених досліджень приймаємо $B=0,08$ м;
- висоту зразка, зважаючи на необхідність виключення впливу горизон-

тального стиску зразка, $h=0,05$ м.

Перевірка щільності ґрунту контролювалась за допомогою зважування. Відомими лабораторними методами визначалася вологість.

Кодування, згідно матриці експерименту (табл. 3.2), показано в табл. 3.3. Зразок клався на гнучку пластину пристосування і поступово згинався. При появі на зразку вертикальної тріщини, після закінчення зміни її розмірів, за поширенням вертикальної тріщиною та розміщенням горизонтальних тріщин проводилися заміри зони розтягу та стиску зразка (рис. 3.8.). За характеристику бімодульності приймалося співвідношення зони розтягу до зони стиску.

Таблиця 3.3

Кодування факторів

№	Фактор	познач.		інт.	Рівні варіації					
		нат.	код.		натуральні			кодовані		
					верх	0	ниж	верх	0	ниж
1	Вологість, %	X1	x1	4,2	15,2	11,0	6,8	+1	0	-1
2	Щільність, г/см ³	X2	x2	0,06	1,62	1,56	1,50	+1	0	-1



Рис. 3.8. Визначення співвідношення зони стиску до зони розриву ґрунтових зразків

Як додаткові, для перевірки достовірності і адекватності результатів, проводилися заміри зусилля, яке фіксувалося на динамометрі при появі вертикальної тріщини, з подальшим перерахунком на напруження згину.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Дослідження впливу фізичних характеристик ґрунту на співвідношення висоти зони розтягу до зони стиску при згині ґрунтової скиби

Отримані рівняння регресії, які представлені у вигляді двофакторних моделей, окремо для кожного типу ґрунту. Реалізація програми і результати експериментів, згідно матриці планування ПФЕ типу 2^2 , для легкого суглинку, напівтвердого супіску, суміші (1:1 за об'ємом) легкого суглинку з гумусом наведені в табл. 4.1.

Після проведення регресійного аналізу даних експериментальних досліджень, визначення коефіцієнтів регресії, перевірки результатів за критеріями Кохрена (відтворюваність) та Фішера (адекватність) рівняння регресії у закодованому вигляді мають вигляд:

для суглинку:

$$y = 3,938 - 0,498 \cdot x_1 - 0,005 \cdot x_2; \quad (4.1)$$

для супіску:

$$y = 3,177 + 0,653 \cdot x_1 + 0,310 \cdot x_2; \quad (4.2)$$

для суміші суглинку з гумусом:

$$y = 2,581 - 0,713 \cdot x_1 - 0,169 \cdot x_2; \quad (4.3)$$

Провівши перевірку значущості коефіцієнтів рівняння регресії за критерієм Ст'юдента, встановили, що для досліджуваних типів ґрунтів коефіцієнт b_2 – не значущий.

Після виключення з рівнянь регресії незначущих коефіцієнтів і перевірки на адекватність, здійснивши перехід від кодових величин у рівняннях (4.1), (4.2), (4.3) до натуральних, отримаємо регресійні моделі:

для легкого суглинку:

$$k_h = h_p/h_c = 5,246 - 0,119 \cdot W\% \quad (4.4)$$

для напівтвердого супіску:

$$k_h = h_p/h_c = 0,433 + 0,131 \cdot W\% \quad (4.5)$$

для суміші легкого суглинку з гумусом:

$$k_h = h_p/h_c = 7,925 - 0,178 \cdot W\% \quad (4.6)$$

Таблиця 4.1

Математична обробка дослідних даних за відношенням зони розтягу до зони стиску ґрунтового шару при його згині

№	Фактори		Відношення зони розтягу до зони стиску, h_p/h_c				Середня квадратична похибка, S_c	Коефіцієнт варіації, v , %	Відносна похибка, ε , %	Довірчий інтервал з ймовірністю, $\alpha=0,95$
	W , %	ρ , г/см ³	Повторюваність			Середнє				
			перша	друга	третя					
Суглинок										
1	6,8	1,50	3,55	4,00	4,53	4,03	±0,491	12,18	8,33	2,81–5,24
2	6,8	1,62	4,36	5,13	5,05	4,85	±0,423	8,74	6,69	3,80–5,90
3	15,2	1,50	3,40	4,17	4,01	3,86	±0,406	10,53	7,94	2,18–4,31
4	15,2	1,62	2,65	3,17	3,24	3,02	±0,322	10,67	8,17	2,85–4,87
Середні значення:							±0,415	10,53	7,79	
Супісок										
1	16,0	1,59	2,10	1,72	1,80	1,87	±0,200	10,69	8,07	1,38–2,37
2	16,0	1,71	2,70	3,44	3,38	3,17	±0,411	12,95	9,94	2,15–4,19
3	26,0	1,59	3,30	4,00	4,28	3,86	±0,505	13,08	9,67	2,61–5,11
4	26,0	1,71	4,00	4,08	3,32	3,80	±0,418	10,99	8,42	2,76–4,84
Середні значення:							±0,383	11,93	9,03	
Суміш (1:1) суглинку з гумусом										
1	26,0	1,59	4,00	3,25	4,48	3,91	±0,620	15,85	11,25	2,37–5,45
2	26,0	1,71	2,21	2,92	2,90	2,68	±0,404	15,10	11,62	1,67–3,68
3	34,0	1,59	1,50	1,44	1,83	1,59	±0,210	13,21	10,06	1,07–2,11
4	34,0	1,71	2,33	1,78	2,33	2,15	±0,318	14,79	11,39	1,36–2,94
Середні значення:							±0,388	14,74	11,08	

Теоретичні і експериментальні значення для легкого суглинку мають допустиму збіжність (похибка становить 10,7%), для напівтвердого супіску та суміші легкого суглинку з гумусом похибка є значною (відповідно 15,2% та 17,3%).

У результаті досліджень встановлено, що щільність, при умовах експерименту, не впливає на відношення зони розтягу до зони стиску при згині шару ґрунту. Залежність спостерігається лише від вологості ґрунту.

У зв'язних шарах ґрунтах (орний шар) зі зростанням вологості (у легкого суглинку – від 6,8% до 15,2% та в його суміші з гумусом – від 26,0% до 34,0%) коефіцієнт k_h зменшується, а в менш зв'язних підорних шарах (у напі-

втвердого супіску – від 16,0% до 26,0%) навпаки – збільшується.

Внаслідок зміщення, при поперечному згині ґрунтового шару, нейтральної лінії в сторону стиску, більша частина ґрунтового шару буде працювати на розрив, що буде сприяти малим енергозатратам при розробці ґрунту даним способом. Зміщення відбувається внаслідок різного опору ґрунту деформації розтягу та стиску. Згідно до результатів експерименту, при $h_p/h_c=1,6...4,9$, частка поперечного перерізу ґрунтового шару, що сприйматиме розтяг, відповідно, становить 62...83%. Тому використання поперечного згину в робочих органах машин буде сприяти зменшенню їх енерговитрат.

Тріщина на зразках в зоні розриву була видима чітко, а в зоні стиску – ні, внаслідок чого ґрунт в верхньому шарі менше руйнується. При глибині розробки 20 см зона стиску становитиме 3,4...7,6 см. Малоінтенсивне подрібнення даного шару сприятиме створенню ґрунтозахисних ерозійно стійких структурних ґрунтових агрегатів.

Отримані експериментальні значення узгоджуються з експериментальними даними інших досліджень [36].

4.2. Порівняльний аналіз теоретичних досліджень

При дослідженні відношення висоти зони розтягу до зони стиску при згині ґрунтової скиби теоретичні і експериментальні значення для легкого суглинку мають допустиму збіжність (похибка становить 10,7%), для напівтвердого супіску та суміші (1:1) легкого суглинку з гумусом похибка є значною (відповідно 15,2% та 17,3%).

Збіжність теоретичних і експериментальних значень при визначенні відносної деформації розриву для легкого суглинку та суміші (1:1) легкого суглинку з гумусом характеризується середньою, як для ґрунту, похибкою (відповідно 14,6% та 13,9%) та дуже значною для напівтвердого супіску (29,4%).

Теоретичні і експериментальні значення досліджень тягового опору поверхонь мають допустиму, як для ґрунту, збіжність (похибка становить 8-

16%).

При дослідженні структури розпушеного ґрунту в лабораторних умовах збіжність теоретичних та експериментальних даних є дещо кращою (похибка не перевищує 10%) ніж при польових дослідженнях, де збіжність теоретичних та експериментальних даних має задовільну збіжність 5,4-15,9% для поверхонь з переважанням згину ґрунтового шару, та дуже значну розбіжність (60,2%) на поверхнях де додатково був присутнім стиск ґрунтового шару.

4.3. Порівняльний розрахунок техніко-економічних показників

Метою економічного розрахунку є визначення доцільності впровадження у виробництво нового робочого обладнання ярусного розпушувача.

Економічний ефект визначався у порівнянні з відомим аналогічним ярусним глибокорозпушувачем, але з лінійчатими ґрунторозпушувальними поверхнями [68]. Доцільність використання такого глибокорозпушувача (з лінійчатыми поверхнями) було доведено позитивним ефектом, отриманим внаслідок значного приросту врожайності сільськогосподарських культур, в порівнянні з традиційними розпушувачами [48].

Розрахунок проводився для двох'ярусного тристоякового глибокорозпушувача. Конструктивне виконання рами робочого органу та кріплення ґрунторозпушувальних поверхонь для обох розпушувачів є ідентичним. Так, як ґрунторозпушувальні поверхні мають схожий принцип дії, а якісна оцінка структури розпушеного ґрунту не мала суттєвих відмінностей, то порівняння проводилося на основі визначення питомих енергетичних показників. Найбільша частка витраченої непоновлювальної енергії при розпушенні ґрунту припадає на паливо.

Вихідні дані до розрахунку.

Таблиця 4.2.

Характеристики базової та нової машини				
№	Показники	Одиниці виміру	Базова машина	Нова машина
1.	Базовий трактор	-	ДТ-75	ДТ-75
2.	Номінальне тягове зусилля	кН	30	30
3.	Номінальна потужність двигуна	кВт	55	55
4.	Питома витрата пального	г/(кВт·год)	265	265
5.	Конструкція робочого органу	-	двоюрусний, тристояковий	двоюрусний, тристояковий
6.	Вага робочого органу (з ґрунтом)	кН	7,1	7,1
7.	Тип ґрунторозробної поверхні	-	лінійчата	радіальна
8.	Кількість ґрунторозробних поверхонь	шт.	6	6
9.	Глибина розробки	м	0,3	0,3
10.	Ширина захвату робочого органу	м	1,5	1,5
11.	Робоча швидкість руху	м/с	1,6	1,6

Розрахунок технічної продуктивності

$$P_T = 0,36B \cdot V_{agr}, \text{ га/год.}$$

Базова машина:

$$P_T = 0,36 \cdot 1,5 \cdot 1,6 = 0,9 \text{ га/год.}$$

Нова машина:

$$P_T = 0,36 \cdot 1,5 \cdot 1,6 = 0,9 \text{ га/год.}$$

Визначення тягового зусилля

$$P_T^{azp} = G_{agr} \cdot f - jkbh + j \cdot m[kh(2\delta + b) + P_T^{nov}], \text{ кН;}$$

де P_T^{nov} – тягове зусилля, яке затрачається на одну ґрунторозпушувальну поверхню. Значення P_T^{nov} приймаємо на основі експериментальних результатів (див. табл. 4.7), з врахуванням зміни площі поперечного перерізу ґрунтового шару від $h \times L = 0,1 \cdot 0,32 \text{ м}^2$, при експерименті, до $h \times L = 0,15 \cdot 0,4 \text{ м}^2$ в заданих умовах. Згідно цього для базової машини $P_T^{nov} = 1,38 \cdot 1,875 = 2,93 \text{ кН}$, для нової машини $P_T^{nov} = 1,18 \cdot 1,875 = 2,21 \text{ кН}$.

Базова машина:

$$P_T^{azp} = 7,1 \cdot 0,5 - 2 \cdot 30 \cdot 0,15 \cdot 0,15 + 2 \cdot 3[30 \cdot 0,15(2 \cdot 0,015 + 0,15) + 2,93] = 24,61 \text{ кН.}$$

Нова машина:

$$P_T^{azp} = 7,1 \cdot 0,5 - 2 \cdot 30 \cdot 0,15 \cdot 0,15 + 2 \cdot 3[30 \cdot 0,15(2 \cdot 0,015 + 0,15) + 2,21] = 20,34 \text{ кН.}$$

Годинна витрата пального

$$Q = 0,001q \cdot P_T^{asp} \cdot V_{asp}, \text{ кг/год};$$

де q – питома витрата пального, г/(кВт·год).

Базова машина:

$$Q = 0,001 \cdot 265 \cdot 24,61 \cdot 1,6 = 10,43 \text{ кг/год.}$$

Нова машина:

$$Q = 0,001 \cdot 265 \cdot 20,34 \cdot 1,6 = 8,63 \text{ кг/год.}$$

Питомі грошові витрати

$$K_m = C \cdot Q / P_T, \text{ грн./га};$$

де C – ціна 1 кг дизельного пального. Станом на 04.2004 $C = 2,00$ грн/кг.

Базова машина:

$$K_{б.м.} = 2,00 \cdot 10,43 / 0,9 = 23,18 \text{ грн/га.}$$

Нова машина:

$$K_{н.м.} = 2,00 \cdot 8,63 / 0,9 = 19,18 \text{ грн/га.}$$

Показники економічної ефективності

Економічний ефект:

$$E = K_{б.м.} - K_{н.м.} = 23,18 - 19,18 = 4,0 \text{ грн/га.}$$

Коефіцієнт економічної ефективності:

$$e = (K_{б.м.} - K_{н.м.}) / K_{б.м.} = (23,18 - 19,18) / 23,18 = 0,173.$$

З курсу економічної теорії відомо, що впровадження є доцільним (рентабельним) якщо $e \geq 0,15$.

Підсумкові результати

Результати розрахунків зводимо в табл.4.3.

Таблиця 4.3.

Порівняльні показники ефективності впровадження

№	Показники	Одиниці виміру	Базова машина	Нова машина
1.	Технічна продуктивність	га/год	0,9	0,9
2.	Необхідне тягове зусилля	кН	24,61	20,34
3.	Годинна витрата пального	кг/год	10,43	8,63
4.	Питомі грошові витрати	грн/га	23,18	19,18
5.	Економічний ефект	грн/га	-	4,0
6.	Економічна ефективність	%	-	17,3

4.4. Висновки до розділу

- Підтверджено прийнятий механізм фізичного процесу подрібнення ґрунтової скиби згином, за якою ґрунтовий шар руйнується внаслідок почергових горизонтальних та вертикальних розшарувань, з відсутністю перемішування. Нижні шари є деформуючими для вищих. Інтенсивність подрібнення наростає в напрямку від початкового нейтрального шару.
- Встановлено суттєвий вплив вологості ґрунту на співвідношення величини зони розтягу до зони стиску при згині ґрунтової скиби. У більш зв'язних ґрунтах зі зростанням вологості це співвідношення зменшується (у легкого суглинку – від 6,8% до 15,2% та в його суміші з гумусом (1:1 за об'ємом) – від 26,0% до 34,0%), а в менш зв'язних (у напівтвердого супіску – від 16,0% до 26,0%) навпаки – збільшується. При згині ґрунтової скиби 63-82% об'єму працює на розрив, що сприяє малим енерговитратам при розробці ґрунту даним способом.
- Руйнування макроструктури ґрунтового зразка відбувається на кінці зони пропорційної деформації. Додаток гумусу в ґрунт надає йому пружних властивостей, збільшує зону пропорційних деформацій і викликає збільшення міцності зразка.
- Тягове зусилля залежить в більшій мірі від глибини розробки ґрунту ніж від кінцевого поперечного радіусу поверхні.
- Розроблена методика інженерного розрахунку і вибору основних параметрів робочого обладнання ярусного глибокорозпушувача.
- Доведено економічну доцільність впровадження нового розпушувача за питомими енергетичними показниками. Показник економічної ефективності становить 17,3%.

ВИСНОВКИ

1. Робота присвячена вирішенню задачі підвищення ефективності глибокого розпушення ґрунту шляхом створення нового ярусного робочого органа глибокорозпушувача з обґрунтуванням його конструктивно-технологічних параметрів на основі врахування фізико-механічних характеристик ґрунту в орному та підорних шарах.

2. Аналіз чинних способів і засобів глибокого розпушення ґрунту показав неповну їх відповідність сучасним агротехнічним вимогам до якості виконання процесу та його диференціації за глибиною обробітку.

3. Ґрунтуючись на попередніх дослідженнях, встановлено, що перспективним напрямом усунення вказаних недоліків є створення нового, ярусно-адаптованого до ґрунтових умов робочого органа, основним принципом роботи якого є згин ґрунтової скиби.

4. На основі методів оптимізації та математичного моделювання, теоретично обґрунтовано аналітичні залежності для визначення форми (2.15) та параметрів ґрунторозпушувальних поверхонь: кінцевого радіуса (2.19), ширини (2.23), довжини (2.29) та їх рознесення в напрямі руху машини: вертикального (2.56) та горизонтального (2.61, 2.62) взаємного зміщення різальних кромки, кута встановлення поверхні до дна борозни, які дають змогу визначити раціональні значення цих параметрів (табл. 5.1, 5.2), диференційованих за глибиною обробітку.

5. Експериментальна перевірка аналітичної залежності (2.9) між величиною подрібнення ґрунтової скиби при її згині та фізико-механічними характеристиками ґрунту підтвердила адекватність обґрунтування основних параметрів запропонованого робочого органа глибокорозпушувача.

6. Отримані регресійні залежності впливу вологості та щільності на співвідношення зони розтягу до зони стиску ($k_h=1,6\dots4,9$) (табл. 4.1) і на деформацію розриву для легкого суглинку ($\varepsilon_p=0,5-1,0\%$), напівтвердого супіску ($\varepsilon_p=0,3-1,0\%$) та легкого суглинку з добавкою гумусу ($\varepsilon_p=2,1-4,2\%$) дозволяють

отримати вихідні дані для розрахунку раціональних параметрів ґрунторозпушувальних поверхонь та всього робочого органа в цілому.

7. Експериментальними дослідженнями впливу фізико-механічних показників ґрунту та конструктивних параметрів ґрунторозпушувальних поверхонь на якість розпушення ґрунту підтверджено обернену залежність між ступенем подрібнення ґрунту та кінцевим радіусом і глибиною обробітку (табл. 4.5) з розбіжністю теоретичних та експериментальних даних 5-16%.

8. Порівняння техніко-економічних показників розробленого глибокорозпушувача з найбільш близьким конструктивно ярусним безвідвальним робочим органом та найбільш поширеним серійним відвальним знаряддям показало більшу його ефективність, відповідно: за показниками якості розпушення – 2,1% і 21,0%; за питомим тяговим опором – 18,0% і 26,6%; за відносними кількісно-якісними показниками – 20,8% і 30,9%. У порівнянні з найбільш конструктивно близьким безвідвальним ярусним робочим органом економічна ефективність за витратою паливних матеріалів становить 17,3%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Fang H.I., Chan W.F. New method for determination of tensile strength of soils. Highway research record, 345 с., 1971. с. 62-68.
2. Romanovsky A.L., Kravets S.V., Tkachuk V.F., Nechidjuk A.A. Multi-tier plough. International publication №. W 091/03607 International application № PCT/SU 89/00238. The International Bureau of WIPO, Geneva, Switzerland, 21.03.91.
3. Wasserleitungen und Abwasserleitungen von Ing. Adolf Böhm und Dipl.-Gwl. Gisela Lischka, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1989.
4. Анисимов В.Ф. и др. Лесные машины. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 512с.
5. Анискин В.И., Спирин А.П., Жук А.Ф. Комплекс почвозащитной техники нового поколения. Техника в сельском хозяйстве. №3, 2001. С. 3-6.
6. Анісімов В.Ф., Музичук В.І., Нахайчук О.В., Козак Ю.М. Приводні вали транспортних засобів. Дослідження, проектування, експлуатація. Монографія. – Вінниця: ВНАУ, 2013. 337 с
7. Бабицкий Л.Ф. Взаимосвязь деформационной постоянной и твердости почвы как основа для определения формы почвообрабатывающих рабочих органов // Вісник аграрної науки: Науково-теоретичний журнал УААН. №4, 1996. С. 93-97.
8. Беляев В.И. Совершенствование технологического процесса рыхления почвы // Техника в сельском хозяйстве. №2-3, 1992. С. 27-29.
9. Берестов Е.И. Нагруженность рабочего органа землеройной машины // Строительные и дорожные машины. №8, 2000. С. 35-37.
10. Бойко І.М., Сало В.М., Серета Л.І. Формалізація процесу безполицевого обробітку ґрунту. Техніка АПК: Науково-технічний журнал. №10-12, 2001. С. 25-26.
11. Бойков В.М., Старцев С.В. Плуг для почвозащитной технологии // Земледелие. №2, 2000. С. 27.

12. Будівельні і меліоративні машини: Підручник під заг. ред. д.т.н., проф., акад. В.Л. Баладінського. –Рівне: РДТУ, 1999. 404 с.
13. Бурченко П.Н. Обработка почвы от В.П.Горячкина до наших дней // Техника в сельском хозяйстве. №6, 1999. С. 34-36.
14. Волик Б.А. Імовірнісна модель розпушення ґрунту лемешем // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Кіровоград: КДТУ, 2003. вип 33. С.89-94.
15. Волик Б.А., Колбасин А.А., Хотюн Г.В. Методика оценки качества обработки почвы // Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету. №1, 2002. С. 21-23.
16. Волик Б.А., Хотюн Г.В., Кривцун А.А. Исследование закономерностей распространения линий скалывания от движущегося в почве лемеха // Вісник ХДТУСГ “Механізація с.г. виробництва”. Харків: ХДТУСГ, 2002. вип. 11., С.145-150.
17. Головачев Е.А., Шатохин А.В. Концепция структурной организации почв. Вісник аграрної науки: Науково-теоретичний журнал УААН. №1, 1996. С. 19-22.
18. Гуков Я.С. Грицишин М.І. Погорілий Л.В. та ін. Концепція розроблення системи машин для виробництва сільськогосподарської продукції // Вісник аграрної науки: Науково-теоретичний журнал УААН. №9, 2002. С. 48-50.
19. Гуков Я.С. Обробіток ґрунту. Технологія і техніка. Механіко-технологічне обґрунтування енергозберігаючих засобів для механізації обробітку ґрунту в умовах України. К.: Нора-прінт, 1999. 280 с.
20. Гуков Я.С. Проблеми обробітку ґрунту і шляхи їх розв’язання. Вісник аграрної науки: Науково-теоретич журнал УААН. №1, 1996. С. 28-30.
21. Гунько І.В. Сучасні методи розрахунку робочих процесів ДВЗ. Яцковський В.І., Гунько І.В., Гуцаленко О.В. Монографія. Вінниця, РВВ ВНАУ, 2016. 131 с

22. Гунько І.В. Технічний сервіс в АПК. Навчальний посібник для курсового та дипломного проектування. Супрун Д.Г., Гунько І.В., Паладійчук Ю.Б., Швець Л.В. Вінниця, ВНАУ, 2012. 197с.
23. Дринча В.М., Мазитов Н.К., Борисенко И.Б. Экологические и агротехнические аспекты развития почвозащитных технологий // Тракторы и сельскохозяйственные машины. №4, 2003. С. 9-13.
24. Дубровін В.О., Сушко Д.С., Волик Б.А. та ін. Особливості основного обробітку ґрунту при вирощуванні кукурудзи // Науковий вісник НАУ. – К.: НАУ, 2004. вип. 73., Ч.2. С. 55-59.
25. Жилкин В.А. Движение частицы почвы по поверхности орудий сельхозмашин // Техника в сельском хозяйстве. №5, 1997. С. 33-35.
26. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. В 2 т. Харків: Око, 2001. Т.І (ч.1): Машини та знаряддя для обробітку ґрунту. 444 с.
27. Золотаревская Д.И. Закономерности деформирования почв и их математическое моделирование // Почвоведение. №1, 1998. С. 110-120.
28. Казакевич П.П. Обоснование формы ортогонального сечения симметричного плужного корпуса. Техника в сельском хозяйстве. №5, 1998. С. 20-23.
29. Калетнік Г.М. Основи інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість. Ч I, II : Підручник/ Г.М. Калетнік, М.Г. Чаусов, В.М. Швайко, В.М. Пришляк, А.П. Пилипенко, М.М. Бондар. К.: Хай-Тек-Прес, 2011. 616 с.
30. Калетнік Г.М. Основи інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість. Ч.ІІІ: Підручник / Г.М. Калетнік, М.Г. Чаусов, В.М. Швайко, В.М. Пришляк та ін.. К.: Хай Тек-Прес, 2013. 528 с.
31. Калетнік Г.М., Теоретичні основи моделювання та фінансово-економічні розрахунки в менеджменті та бізнесі. Навчальні посібники ./ Г.М. Калетнік, С.В. Козловський, О.Г. Підвальна. Вінницький національний аграрний університет., 2009.

32. Канівець В.І. Життя ґрунту: Наукове видання. 2-ге вид., доп. К.: Аграрна наука, 2001. 132 с.
33. Коломієць М.В. Оптимізація обробітку ґрунтів лісостепу: наукові та прикладні аспекти. Вісник аграрної науки: Науково-теоретичний журнал УААН. №1, 1998. С. 12-16.
34. Кондратюк Дмитро Гнатович. Удосконалення робочого процесу та обґрунтування параметрів ротаційних граблів-сіноворушилок з відцентровими робочими органами : Автореф. дис...канд. техн. наук (05.20.01) / Дніпропетровський аграрний ун-т. Дніпропетровськ, 1995. 24 с.
35. Кондратюк Дмитро Гнатович. Удосконалення робочого процесу та обґрунтування параметрів ротаційних граблів-сіноворушилок з відцентровими робочими органами : Автореф. дис...канд. техн. наук (05.20.01) / Дніпропетровський аграрний ун-т. Дніпропетровськ, 1995. 24 с.
36. Корабельский В.І., Кравчук В.І., Павлоцкая В.А. Техническое обоснование и использование в экологической почвообработке поверхностей знакопеременного воздействия. Техніка АПК: Науково-технічний журнал. №7-9, 2001. – С. 24-26.
37. Королев В.А. Изменение физических свойств черноземов обыкновенных при длительном сельскохозяйственном использовании Почвоведение. №6, 2002. С. 697-704.
38. Коршиков А.А., Михайлин А.А. Глубокое рыхление почвы – надежный прием накопления влаги. Земледелие. №5, 2000. С. 10-11.
39. Кравець С.В. Ґрунтозахисні та енергозберігаючі машини для прокладання підземних комунікацій. Рівне: РДТУ, 1999. 277 с.
40. Кравець С.В., Ткачук В.Ф., Лук'янчук О.П. Силова взаємодія поверхні кришильного ковша з розроблювальним ґрунтом // Вісник УДУВГП, Збірник наукових праць. Рівне: УДУВГП, 2002, вип. 5 (18), с. 22-29.
41. Кравчук В.І., Гуков Я.С. Енерговитрати при розпушенні ґрунту механічним способом // Вісник аграрної науки: Науково-теоретичний журнал УААН. №5, 2001. С. 56-59.

42. Липець Е., Медведєв В.В., Линдіна Т.Є. Вплив щільності ґрунту на за-
своєння сільськогосподарськими культурами поживних елементів. Віс-
ник аграрної науки: Науково-теоретичний журнал УААН. №5, 2002. С.
11-15.
43. Лук'янчук О.П. Експериментальні дослідження ґрунтової балки на
згин. Вісник УДУВГП, Збірник наукових праць. Рівне: УДУВГП, 2003,
вип. 2 (21), с. 151-156.
44. Мазитов Н.К., Садриев Ф.М., Парфенов С.А. и др. Выбор компоновки
рабочих органов блочно-модульных культиваторов. Техника в сельском
хозяйстве. №6, 2001. С. 30-32.
45. Максименко В.П. Комплекс машин для глубокого рыхления почвы с
внесением животноводческих стоков // Тракторы и сельскохозяйствен-
ные машины. №10, 2003. С. 11-13.
46. Медведєв В.В., Лактіонова Т.М., Почепцова Л.Г. Вплив структури
ґрунту на фільтраційну здатність // Вісник аграрної науки: Науково-
теоретичний журнал УААН. №3, 2003. С. 5-7.
47. Никифоров Ю.П. Основные направления совершенствования рабочего
органа навесного рыхлителя // Строительные и дорожные машины. №1,
1999. С. 33-34.
48. Новинки патентной информации. Комбинированная машина для безот-
вальной обработки почвы // Земледелие. №4, 2001. – С. 39-41.
49. Павлоцький А.С., Савченко І.Ф. Використання ґрунтодеформуючої
поверхні у проектуванні робочих органів // Вісник аграрної науки: Нау-
ково-теоретичний журнал УААН. №8, 2000. – С. 51-53.
50. Панов И.М. Почвообрабатывающая техника: состояние и проблемы
развития Тракторы и сельскохозяйственные машины. №11, 2003. С. 9-11.
51. Панченко А.Н., Данильчук С.Р. Культиватор с U-образными лапами
для поверхностной обработки почвы // Вісник ДДАУ: Науково-
теоретичний, науково-практичний журнал: – К: Аграрна наука. №1,
2002. С. 7-9.

52. Панченко А.Н., Данильчук С.Р., Янчук В.И. Новые сельскохозяйственные орудия для фермерских хозяйств конструкции ДГАУ // Вісник ДДАУ: Науково-теоретичний, науково-практичний журнал: – К: Аграрна наука. №2, 2002. – С. 75-80.
53. Пришляк В.М., Погорілець О.М.. Сільськогосподарські машини: розрахунок, проектування. Методичні вказівки до виконання курсової роботи. ВНАУ, 2016. С. с.84.
54. Рижий О.П. Обґрунтування параметрів багатоярусного агро меліоративного розпушувача: Дис. канд. техн. наук – Львів, 2003. - 177 с.
55. Свечников П.Г. Кинематика оборота пласта при отвальной вспашке почвы // Техника в сельском хозяйстве. №3, 2000. С. 19-20.
56. Серeda Л.П Розробка і дослідження ґрунтообробної машини для технології strip-till з активними фрезерними робочими органами/ Серeda Л.П, Труханська О.О., Швець Л.В. // Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та технологіях” / Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. Вінниця, 2019. 4 (95)
57. Сисолін П., Сало В. Уніфіковані ґрунторозпушувачі для захисних систем землеробства // Техніка АПК: Науково-технічний журнал. №2, 2000. С. 12-15.
58. Слинько О.П., Дубровін В.О. Виробнича перевірка та визначення економічної ефективності використання робочих органів роторного типу у складі модернізованого культиватора КРН-4,2 // Науковий вісник НАУ. К.: НАУ, 2004. вип. 73., Ч.2. С. 85-94.
59. Стрельченко В.П., Бовсуновський А.М., Налапко М.В. Вплив рослинних решток в орному шарі ґрунту на продуктивність сівозмін // Вісник аграрної науки: Науково-теоретичний журнал УААН. №3, 2003. С. 9-11.
60. Тищенко С.С., Дубровін В.О., Сушко Д.С. Визначення сил, що діють на скибу з боку робочої поверхні плужного корпусу // Науковий вісник НАУ. К.: НАУ, 2003. вип. 60. С. 323-329.

61. Тищенко С.С., Волик Б.А. Обобщенная геометрическая модель адаптивной поверхности рабочего органа почвообрабатывающей машины // Праці. Таврійська державна агротехнічна академія. – Мелітополь: ТДА-ГА, 2001. – вип. 2., Т.18. С.39-44.
62. Ткачук В.Ф., Лук'янчук О.П. Возможні технологічні поверхні кришилних ковшів багатоярусного розпушувача. Вісник РДТУ, Технічні науки. Сільськогосподарські науки. Збірник наукових праць. Випуск 3 (16), Рівне 2002, с. 204–210.
63. Ткачук В.Ф., Рижий О.П. Дослідження міцності та деформаційних властивостей талих ґрунтів при розтягуванні // Збірник наукових праць. Випуск 3 (16). Рівне: РДТУ: 2002. с. 211-216.
64. Хайліс Г.А., Коновалюк Д.М. Основи проектування і дослідження сільськогосподарських машин: Навч. Посібник. К: НМК ВО, 1992. 320 с.
65. Хмара Л.А. Интенсификация рабочих процессов навесных рыхлителей // Строительные и дорожные машины. №9, 1993. С. 32-34.
66. Черемсинов В.И., Зангиев А.А. Оптимизация параметров агрегатов для минимальной обработки почвы. Механизация и электрификация сельского хозяйства. №3, 1987. С. 22-23.
67. Черненко В.Я., Брусиловский Ш.И. Глубокое рыхление осушаемых тяжелых почв. М.: Колос, 1983. 63 с.
68. Швець Л.В. Технічний сервіс в АПК. Том І. Навчальний посібник. / Швець Л.В., Паладійчук Ю.Б., Труханська О.О./ Вінницький національний аграрний університет, 2019. 647с.