

УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

Допускається до захисту
Завідувач кафедри
_____ Андрій ВОЙТІК
“ ____ ” _____ 2024 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи
_____ магістр
(освітній рівень)

на тему «ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ОРГАНУ ДЛЯ
ЯРУСНОГО РОЗПУШУВАННЯ ҐРУНТУ»

Виконав: студент 2 курсу, групи 21м-ім
Спеціальність _____ 208 Агроінженерія
_____ Сергій ГОНЧАРУК
(прізвище та ініціали)

Керівник _____ Юрій КОВАЛЬЧУК
(прізвище та ініціали)

Рецензент _____ Олександр ТРУС
(прізвище та ініціали)

м. Умань – 2024 рік

УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

Освітній рівень магістр

Спеціальність 208 Агроінженерія
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Андрій ВОЙТІК

“ ” 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Гончаруку Сергію Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Обґрунтування параметрів робочого органу для ярусного розпушування ґрунту»

керівник роботи Ковальчук Ю.О., к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від

“ 04 ” листопада 20 24 р. № 01-06/298

2. Строк подання студентом роботи 27.11.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: фізико-механічні властивості ґрунту; існуючі технологічні процеси та технічні засоби для глибокого розпушення ґрунту.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): аналіз існуючих способів та засобів для глибокого розпушення ґрунту без обороту пласта, огляд попередніх досліджень з даного питання; визначення впливу властивостей ґрунту на якість його обробітку; обґрунтування технологічної схеми розроблюваної машини; обґрунтування оптимальних параметрів робочих органів досліджуваної машини; дослідження фізико-механічних характеристик ґрунту; розробка заходів з охорони праці при роботі з начіпними машинами; визначення ефективності застосування розробленої машини.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 15 слайдів) як додаток до доповіді за темою магістерської роботи.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Прокопенко Е.В., доцент		

7. Дата видачі завдання 14 вересня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу	02.10.2023 р.	
2.	Розділ 1. Стан питання та задачі досліджень	02.11.2023 р.	
3.	Розділ 2. Теоретичні визначення конструктивних параметрів робочого органу для розпушування ґрунту	02.12.2023 р.	
4.	Розділ 3. Експериментальні дослідження	29.01.2024 р.	
5.	Розділ 4. Охорона праці	15.03.2024 р.	
6.	Розділ 5. Енергетична ефективність машини	30.06.2024 р.	
7.	Виконання графічної частини роботи	17.10.2024 р.	
8.	Представлення роботи керівнику на перевірку	20.11.2024 р.	

Студент

(підпис)

Сергій ГОНЧАРУК

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Юрій КОВАЛЬЧУК

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Гончарук С.М. Обґрунтування параметрів робочого органу для ярусного розпушування ґрунту (Магістерська робота. Умань, Уманський національний університет садівництва, 2024. – 54 с.).

Об'єкт дослідження – технологічний процес та технічні засоби для глибокого розпушування ґрунту.

Предмет дослідження – закономірності впливу параметрів пристрою з ярусними робочими органами на якісні показники його роботи.

Мета роботи – підвищення ефективності процесу глибокого розпушування важких ґрунтів шляхом вдосконалення конструкції робочих органів.

В роботі написано вступ, дана характеристика та приведено аналіз існуючих засобів механізації для глибокого розпушування ґрунту. Проведено огляд і аналіз умов виконання розпушування важких перезволожених ґрунтів. Досліджено фізичну суть процесу розпушення ґрунту.

Приведено розрахунок дослідження напружено-деформованого стану ґрунтової скиби. Обґрунтовано форму поверхні розпушуючого елементу

Проведено дослідження по визначенню фізики процесу розпушування ґрунту.

Запропоновані заходи з покращення умов охорони праці та довкілля. Визначено енергетичну ефективність від впровадження запропонованого пристрою у виробництво.

Зроблено висновки і пропозиції, складено список використаної літератури, оформлено додатки.

Ключові слова: ґрунт, розпушування, багаторуслий робочий орган, розпушувальна поверхня.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ	6
1.1. Вплив агрономіоративного розпушення на агротехнологічні властивості ґрунтів	6
1.2. Фізична суть процесу глибокого розпушення ґрунту	10
2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ БАГАТОЯРУСНОГО РОЗПУШЕННЯ ҐРУНТУ	15
2.1. Загальна характеристика процесу багатоярусного розпушення ґрунту...	15
2.2. Дослідження напружено-деформованого стану ґрунтової скиби	16
2.3. Обґрунтування форми транспортувальної поверхні ґрунторозпушувального елемента	16
3. МЕТОДИКА І РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	37
3.1. Задачі експериментальних досліджень	37
3.2. Програма експериментальних досліджень	37
3.3. Дослідження фізики процесу розпушення ґрунту ґрунторозпушувальним елементом	38
4. ОХОРОНА ПРАЦІ	43
5. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОЯРУСНОГО РОЗПУШУВАЧА	45
5.1. Вихідні дані для розрахунку	45
5.2. Розрахунок енергетичних витрат	45
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	49

ВСТУП

Аналіз сучасного стану сільськогосподарських угідь показує, що Західній Україні переважають перезволожені важкі ґрунти з незадовільними водно-фізичними властивостями. [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Характерними особливостями таких ґрунтів є їх слабка водопроникність, низька водовіддача та структура з низькою агрономічною цінністю. Основним способом поліпшення водно-повітряного режиму таких ґрунтів є їх осушення за допомогою закритого дренажу. Проте за водопроникності підорних горизонтів менше 0,1...0,05 м/добу відведення надлишкової води відбувається за рахунок горизонтальної фільтрації. Це призводить до змиву родючих шарів, ерозійних процесів та подальшої деградації ґрунту, бо за таких умов дренаж працює в режимі закритих збирачів. Тому будівництво закритого матеріального дренажу є необхідною, але недостатньою умовою поліпшення таких земель. Все це вимагає проведення додаткових агротехнічних заходів, які дозволили б поліпшити водопроникність надрейних горизонтів.

Крім того, в результаті здійснення комплексу операцій з обробітку та збирання культур рілля піддається багаторазовому ущільненню ходовими частинами сільськогосподарських і транспортних машин. При цьому ґрунт ущільнюється в 1,2...1,4 рази на глибину 0,4...1,25м [8, 9, 10]. Особливо несприятливі умови розвитку сільськогосподарських культур створюються в результаті довготривалого обробітку на одну і ту ж глибину плоскими лемешами плугів та плоскорізів, що веде до формування плужної підшви з високою щільністю та малою кількістю мікропор.

Ці та інші фактори призводять до досить сталої тенденції зниження родючості ґрунтів. Тому в умовах надлишкового зволоження або ущільнення ґрунтів для покращання фільтраційних властивостей надрейних горизонтів застосовують глибоке розпушення. Однак, конструкції сучасних розпушувачів не в повній мірі відповідають агроеліоративним вимогам і не забезпечують необхідну якість розпушення.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Вплив агроеліоративного розпушення на агротехнологічні властивості ґрунтів

Значна частина земель України відноситься до, так званих, “важких” ґрунтів. Вони характеризуються незадовільним агроеліоративним режимом, що веде до зниження їх продуктивності на 30 % [11, 12, 13, 14].

За класифікацією Н.А. Качинського [15, 16] до “важких” ґрунтів відносять ґрунти, що містять більше 40% фізичної глини та мають щільність $1,5\text{г/см}^3$ і більше. За механічним складом це важкі суглинки, легкі, середні, важкі глини, ґрунти легкого механічного складу (супіски, легкі та середні суглинки), які характеризуються наявністю в підорних горизонтах маловодопроникних шарів, а також переущільнені ґрунти.

Надлишкове зволоження “важких” ґрунтів у періоди дощів, весняної повені або після інтенсивного поливу призводить до зміщення термінів весняних польових робіт, скорочення тривалості вегетаційного періоду, погіршення умов використання сільськогосподарської техніки і, як наслідок, до зниження врожаїв.

До “важких” ґрунтів, незалежно від їх типу і природнокліматичної зони розташування, треба віднести ґрунти переущільнені сільськогосподарською технікою. Погіршення їх фізико-механічних властивостей обумовлене підвищенням одиничної ваги сільськогосподарських машин та збільшенням їх кількості. Крім того, забезпечення сучасних технологій вирощування сільськогосподарських культур вимагає багаторазових проходів по полю сільгоспмашин і агрегатів та іншої транспортно-технологічної техніки. Все це призводить до ущільнення ґрунту в 1,2...1,4 рази і більше на глибину 0,4...1,25 м, в 60...110 разів зменшується його водопроникність, руйнується агроцінна структура та знижуються (на 10...30% і більше) врожаї вирощуваних сільськогосподарських культур [17, 18]. Характеристика ґрунтів за ступенем ущільнення наведена в

таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Ступінь ущільнення ґрунту (за щільністю, г/см³)

Глибина горизонту, см	Ступінь ущільнення ґрунту				
	дуже роз- пушений	розпуше- ний	середньої щільності	ущільне- ний	дуже ущільне- ний
Для ґрунтів із вмістом гумусу в поверхневому горизонті до 4%					
Орний 0...20	1,00	1,0...1,2	1,2...1,4	1,4...1,5	1,5
Підорний 20...50	1,2	1,2...1,35	1,35...1,48	1,48...1,6	1,6
Для ґрунтів із вмістом гумусу в поверхневому горизонті 4% і більше					
Орний 0...20	0,95	0,95...1,1	1,1...1,2	1,2...1,3	1,3
Підорний 20...50	1,1	1,1...1,2	1,2...1,3	1,3...1,4	1,4

Поверхнєве розпушення “важких” ґрунтів є недостатнім заходом, оскільки ущільненими та водонепроникними залишаються більш глибокі шари.

Задача поліпшення агроцінної структури названих ґрунтів вирішується застосуванням цілої низки агротехнічних, організаційно-технологічних та інших рішень.

Організаційно-технологічні прийоми відносяться до профілактичних заходів зі зменшення техногенного впливу техніки.

Агротехнічні заходи направлені на принципову зміну природних або набутих несприятливих фізико-механічних властивостей ґрунтів з метою створення їх оптимального агроеліоративного режиму. Вони включають всі прийоми окультурення ґрунтів, використання органічних добрив та посіву трав в системі сівозмін, різноглибинний обробіток, а також глибоке розпушення та щільювання.

Серед агротехнічних заходів найбільш ефективним в сучасних умовах є розпушення ґрунтів, що дозволяє усунути негативну дію техніки та наблизити властивості зазначених ґрунтів до оптимальних.

Розпушення дозволяє розкришити оброблюваний профіль ґрунту на окремі

структурні агрегати (грудки) та збільшити відстань між ними, в результаті чого покращується водно- та повітропроникність, біологічна активність бактерій. Це дає змогу перерозподілити об'єми горизонтальної і вертикальної фільтрацій (остання зростає приблизно на 30%), скоротити підтоплення орного шару більш як на два тижні, покращити агрегатний склад розпушеного шару ґрунту, збільшити запаси доступної для рослин вологи на 20...30мм, поліпшити умови проникнення корневих систем рослин на більшу глибину. Як показують дослідження, в результаті розпушення родючість земель підвищується на 20...30% [19, 20, 21].

Одним із фізико-механічних показників, що визначає якість розпушення ґрунту, є його щільність. Через механічний опір, аерацію, вологість і температуру ґрунту цей показник здійснює безпосередній вплив на врожай сільськогосподарських культур. Практика показує, що для кожної сільськогосподарської культури існує своя “оптимальна” щільність ґрунту, при якій спостерігається підвищення врожайності. Дані багаторічних дослідів щодо визначення оптимальної щільності ґрунту для різних сільгоспкультур у різних природних зонах приведені в таблиці 1.2 [22, 23, 24].

Таблиця 1.2 – **Величина оптимальної щільності ґрунтів для різних сільськогосподарських культур**

Ґрунти	Культура	Щільність, г/см ³
Дерново-підзолисті	Овес, ячмінь, ярова пшениця, горох, кормові боби, капуста	1,1...1,3
	Картопля	1,0...1,2
	Льон	1,2...1,3
Чорноземи опідзолені	Ярова пшениця, кукурудза, ячмінь, овес, цукровий буряк	1,2...1,3
Чорноземи звичайні та південні	Озима пшениця	1,2...1,3
	Інші зернові	1,1...1,2

Таким чином, діапазон оптимальної щільності для всіх культур на типових

грунтах не виходить за межі $1,0 \dots 1,3 \text{ г/см}^3$. Для зростання зернових культур діапазон оптимальної щільності ґрунту має більшу амплітуду коливання.

Важливою умовою отримання необхідної структури ґрунту є обробіток його в “дозрілому” стані, тобто при оптимальній вологості, коли він добре розпушується. Дослідженнями встановлено, що для кожного ґрунту існує свій інтервал вологості, за якого будь-яке перемішування в процесі розробки веде до утворення зернистої структури. Наприклад, оптимальною для обробітку підзолистого піщаного ґрунту є абсолютна вологість в межах 12...14%, дерново-підзолистих суглинкових ґрунтів – 12...20%, чорноземів – 17...30% [25, 26].

За останні роки в результаті сільськогосподарської діяльності дуже помітним стає процес втрати ґрунтами гумусу у верхніх орних горизонтах. Тому при створенні і використанні розпушувачів треба особливу увагу звертати на зменшення їх негативного техногенного впливу на поверхневі родючі шари.

Узагальнюючи вище наведене, можна сформулювати наступні агротехнічні вимоги до процесу розпушення ґрунту середнього та важкого механічного складу:

- покращення структурного складу орного та підорного горизонтів за рахунок збільшення вмісту агрегатів розмірами від 0,25 до 10мм з перевагою фракцій від 2 до 10мм у поверхневому шарі (до 50...60 %);
- щільність розпушеного ґрунту повинна становити: орного горизонту $1,0 \dots 1,2 \text{ г/см}^3$; підорного горизонту $1,1 \dots 1,35 \text{ г/см}^3$;
- шпаруватість ґрунту при вказаній щільності та його природній вологості повинна становити 50...65 %;
- вміст пилу (фракцій менших 0,25мм) у поверхневому шарі повинен становити не більше 15%.

1.2. Фізична суть процесу глибокого розпушення ґрунту

Розпушувачі обладнані традиційними робочими органами здійснюють процес глибокого розпушення ґрунту, який характеризується критичною глибиною різання, просторовою взаємодією робочого знаряддя з ґрунтом,

утворенням ядер ущільнення, законами розподілу нормального тиску ґрунту на робоче обладнання, перехідною зоною стружкоутворення та напруженим станом відокремленої ґрунтової скиби. Одним із шляхів вдосконалення пасивних робочих органів розпушувачів є обґрунтування їх форми та параметрів на основі вивчення і врахування фізичної суті процесу глибокої розробки ґрунту.

Дослідженням критичної глибини різання займалися німецькі вчені Ратґе та Е. Дінґлінґер [27], які встановили, що відокремлення ґрунтового тіла від піщаного масиву ножом відбувається тільки до деякої глибини різання $h_{кр}$. Подальше заглиблення ножа не збільшує зону руйнування ґрунту в сторони, а лише супроводжується ущільненням його без відокремлення скиби.

Ґрунтове тіло, що утворюється перед лобовою гранню ножа в процесі різання, досліджується в працях [28, 29, 30]. В більшості випадків приймається модель елемента скиби у вигляді центральної трикутної призми і двох бічних частин зрізаного конуса.

Під час розпушення ґрунту перед ріжучою кромкою ножа виникають ґрунтові ядра ущільнення, які доповнюють неоптимальні профілі робочих органів та впливають на процес глибокого різання [31, 32, 33]. В найбільшій мірі опір переміщенню робочих органів зростає через заміну сил тертя ґрунту по сталі на сили тертя ґрунту по ґрунту під час утворення постійних ядер ущільнення.

На денній поверхні на ніж діє мінімальний нормальний тиск, який визначається в залежності від кута різання [34]:

$$q_0 = C \operatorname{ctg} \varphi_0 (k_1 - 1), \quad (1.1)$$

де C – коефіцієнт зчеплення ґрунту;

φ_0 – кут внутрішнього тертя ґрунту;

k_1 – коефіцієнт, який залежить від кута різання ножа.

Із збільшенням глибини різання нормальний тиск на лобовій поверхні ножа зростає, досягає гранично можливого значення в зоні пружно-пластичних деформацій (дорівнює гранично-несучій спроможності ґрунту) і, надалі,

залишається постійним за глибиною.

На основі багатьох експериментальних досліджень по глибокому різанню та механіці ґрунтів закон розподілу нормального тиску на лобову площину ножа у зоні зсуву ґрунту приймається лінійним за глибиною. Епюра нормального тиску має вигляд трикутника або трапеції [35]. У зоні пружно-пластичних деформацій нормальний тиск ґрунту на лобову поверхню ножа постійний, не залежить від геометричних параметрів ножа і дорівнює напруженню ґрунту під час його руйнування (для I, II, III категорії ґрунту відповідно 0,2; 0,5; 0,8 МПа) [36]. Значення його можна вирахувати за формулою Г. Паукера:

$$q_{кр} = \left(\gamma_{гр} h_c + \frac{C}{\operatorname{tg} \varphi_0} \right) \operatorname{tg}^4 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right), \quad (1.2)$$

де $\gamma_{гр}$ – питома вага ґрунту;

h_c – середня глибина сколювання ґрунту ножем.

Лінійний закон розподілу нормального тиску на лобову поверхню ріжучої частини можна обґрунтувати, виходячи з теорії різання Ю.О.Ветрова. Згідно цієї теорії сила різання у верхньому ярусі (за умови, що прорізь утворюється з

боковими розширеннями під кутом $\gamma < \frac{\pi}{2}$) дорівнює:

$$P(h) = \varphi_{\alpha_p} m_b b_c h + 2 m_{бок.зр.} h + 2 m_{бок} h^2, \quad (1.3)$$

де φ_{α_p} – коефіцієнт, який враховує вплив кута різання ножа на опір вільного різання;

m_b – питома сила вільного різання ґрунту ножем з кутом різання 45° ;

b_c, h – відповідно, ширина ножа і глибина різання;

$m_{бок.зр.}, m_{бок}$ – відповідно, коефіцієнти, які характеризують питому силу для додання опору ґрунту при різанні боковими ребрами ножа та питома сила руйнування ґрунту у бокових розширеннях прорізу.

Тоді, середній нормальний тиск ґрунту на лобову поверхню ножа за глибиною верхнього ярусу буде визначатися залежністю:

$$q(h) = \frac{P \cos \varphi}{b_c h \sin(\alpha_p + \varphi)} = (\varphi_{\alpha_p} m_b + 2 \frac{m_{\text{бок.зр.}}}{b_c} + 2 \frac{m_{\text{бок.}}}{b_c} h) \frac{\cos \varphi}{\sin(\alpha_p + \varphi)}, \quad (1.4)$$

де φ - кут зовнішнього тертя ґрунту.

Руйнування ґрунту у нижніх ярусах проходить як з утворенням бокових розширень ($\gamma < \frac{\pi}{2}$), якщо ширина ярусів збільшується знизу до верху, так і без

них ($\gamma = \frac{\pi}{2}$), якщо ширина ярусів постійна за глибиною. В останньому випадку

вираз для сили різання у нижньому ярусі можна записати наступним чином:

$$P(h) = \varphi_{\alpha_p} m_b b_c h + 2 m_{\text{бок.зр.}} h + 2 m_{\text{бок.зс.}} F_{\text{зс}}, \quad (1.5.)$$

де $m_{\text{бок.зс.}}$ коефіцієнт, який характеризує питому силу руйнування ґрунту по

бокових площинах зсуву $F_{\text{зс}} = \frac{h^2 (\text{ctg} \alpha_p + \text{ctg} \psi)}{2}$, і де ψ - кут зсуву ґрунту у

поздовжній площині.

Тоді середній нормальний тиск ґрунту для нижнього ярусу буде визначатись за залежністю:

$$q(h) = (\varphi_{\alpha_p} m_b + 2 \frac{m_{\text{бок.зр.}}}{b_c} + m_{\text{бок.зс.}} (\text{ctg} \alpha_p + \text{ctg} \psi) \frac{h}{b_c}) \frac{\cos \varphi}{\sin(\alpha_p + \varphi)}. \quad (1.6)$$

Таким чином, на підставі проведеного обґрунтування та результатів експериментальних досліджень [38], можна вважати достовірним лінійний закон розподілу нормального тиску ґрунту на лобову поверхню ножа за глибиною ярусу.

Аналіз деформаційних процесів, проведений у зв'язних легкосуглинистих ґрунтах вологістю 30...33% [39], показав, що перед робочою поверхнею ножа частинки ґрунту переміщуються в сторону відкритої поверхні, спучуються і утворюють конус розпушення. У межах конуса розпушення проходять деформації сколювання і відриву, ґрунт розкришується на окремі грудки, на ньому утворюється сітка тріщин. При цьому пружно-пластичні деформації виявляються незначно. Нижче, у закритичній зоні, переважають пружно-пластичні деформації. В залежності від механічного складу ґрунту, його зв'язності та вологості, змінюється глибина зони розпушення, ступінь розпушеності та співвідношення пружних і пластичних деформацій.

Процес поярусного розпушення ґрунту дозволяє замінити традиційний процес глибокої розробки середовища на якісно іншу пошарову розробку, яка дає змогу усунути закритичну зону руйнування ґрунту, покращити його фізико-механічні показники та зменшити енергоємність процесу (до 40%) [39, 40].

Зниження енергоємності розпушення проходить за рахунок того, що кожний ярус робочого органу здійснює розпушення ґрунту тільки у докритичній зоні, а найбільш енергоємна закритична зона ущільнення відсутня. Тому нормальний тиск ґрунту на робочу поверхню багатоярусного робочого органу, судячи з епюри лобового тиску, менший, ніж для традиційного стоякового (рис.1.1).

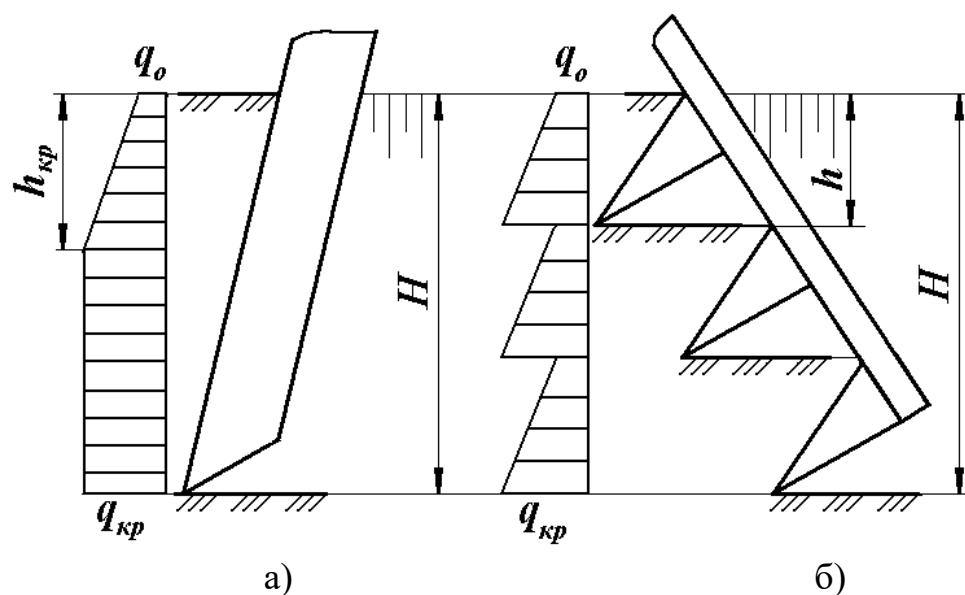


Рисунок 1.1 – Конструкція і характерні епюри розподілу нормального тиску на лобову поверхню робочого органу за глибиною: а) для традиційної конструкції; б) для багатоярусної конструкції.

З метою якісного розпушення ґрунту у зоні механічного впливу та зниження енергоємності процесу конструювання робочих органів потрібно проводити з додержанням наступних вимог:

- використання пошарового розпушення ґрунтового масиву при умові роботи кожного ґрунторозпушувального елемента в докритичній зоні різання;
- забезпечення у кожному ярусі вільного транспортування ґрунту із зони різання в зону зворотної засипки;
- використання додаткового руйнування елементів скиби напруженнями відриву або згину в процесі транспортування ґрунту;
- повздовжній та поперечний профілі робочого органу повинні виключати можливість утворення постійних ядер ущільнення.

Ці вимоги дозволяють обґрунтовано аналізувати існуючі конструкції робочих органів для глибокого розпушення ґрунту, а також цілеспрямовано конструювати принципово нові робочі органи залежно від їх цільового призначення.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ БАГАТОЯРУСНОГО РОЗПУШЕННЯ ҐРУНТУ

2.1. Загальна характеристика процесу багатоярусного розпушення ґрунту

Вихідними даними для проектування та обґрунтування параметрів багатоярусних робочих органів агрономеліоративних розпушувачів є інформація про властивості ґрунтового середовища, як предмета взаємодії з ґрунтообробним знаряддям та агротехнічні вимоги до якості розпушення.

Розпушення проводять на “важких” ґрунтах, для яких характерна мала водопроникність (коефіцієнт фільтрації не перевищує 0.1...0.01м/добу) та велика щільність. Для території України типовими є ґрунти II ... III категорії [42, 43], супіски, суглинки та глини з числом ударів щільноміра $C_{уд.}=5...12$ [14]. Довірчий інтервал їх природної вологості знаходиться в межах 10...15% для супісків; 15...25% - для суглинків і 25...35% - для глин. Цим значенням вологості відповідають наступні показники консистенції: для піску – $0,3 > B_k > 0,2$; для суглинка $0,2 < B_k < 0,4$; для глини $0 < B_k < 0,5$.

Реальні ґрунти представляють собою неоднорідне середовище, як за механічним складом, зчепленням, вологістю, так і за іншими факторами, які змінюються за глибиною їх залягання та по площі [44]. Такі ґрунти можуть містити сторонні включення (каміння, пеньки, корені та інші залишки), що впливає на їх структуру та міцність. Але характер цих змін у переважній більшості випадків невідомий, є випадковим і хаотичним, і тому не може бути врахований при проектуванні агрономеліоративних розпушувачів. Отже, необхідно орієнтуватись на найбільш ймовірну модель ґрунту, яка визначається умовами застосування розпушувачів. Впливом швидкості на опір різанню ґрунту можна нехтувати, якщо її значення не перевищує 1,0м/с [45].

Таким чином, модель ґрунту та схему його багатоярусного різання можна прийняти з наступними допущеннями: ґрунт розглядається як суцільне однорідне ізотропне середовище, яке характеризується механічним складом, пластичністю, зчепленням, кутом внутрішнього і зовнішнього тертя та щільністю; різання ґрунту відбувається, як правило, завдяки деформаціям зрізу і зсуву після порушення рівноваги сил, які діють на елемент скиби, що розглядається як тверде тіло; опір різанню не залежить від швидкості робочого органу.

Процес транспортування відокремленої ґрунтової скиби повинен забезпечуватись з умови вільного виходу зрізаного шару ґрунту з будь-якого підземного горизонту в напрямку денної поверхні, або штучно підготовленого простору. Це досягається створенням у межах ширини захвату між суміжними ґрунторозпушувальними елементами прохідних вікон для спрямування ґрунту в напрямку порожнини, яка утворена попереднім ґрунторозпушувальним елементом. При цьому транспортування елементів скиби може здійснюватися плоскими чи криволінійними направляючими.

Під час розпушення важких та меліорованих ґрунтів вирішальне значення має необхідна ступінь подрібнення підземних горизонтів у щілині, а також встановлення надійного гідравлічного зв'язку між гумусним горизонтом та дренажним улаштуванням. Для таких ґрунтових умов в УДУВГП за участю автора розроблений багатоярусний робочий процес з поярусним транспортуванням ґрунту у порожнину нарізаної щілини криволінійними поверхнями [46].

2.2. Дослідження напружено-деформованого стану ґрунтової скиби

Дослідження напружено-деформованого стану відокремленої від масиву ґрунтової скиби проводилось під час її руху вздовж деякої криволінійної поверхні, поперечні перерізи якої є дугами кіл радіуса $R_x = R_x(x)$ (рис.2.1). Приймалося, що рухома полярна система координат рухається вздовж осі x зі сталою швидкістю $V_{СК}$, а вздовж осі z - за законом $z_1 = R_0 - R_x$.

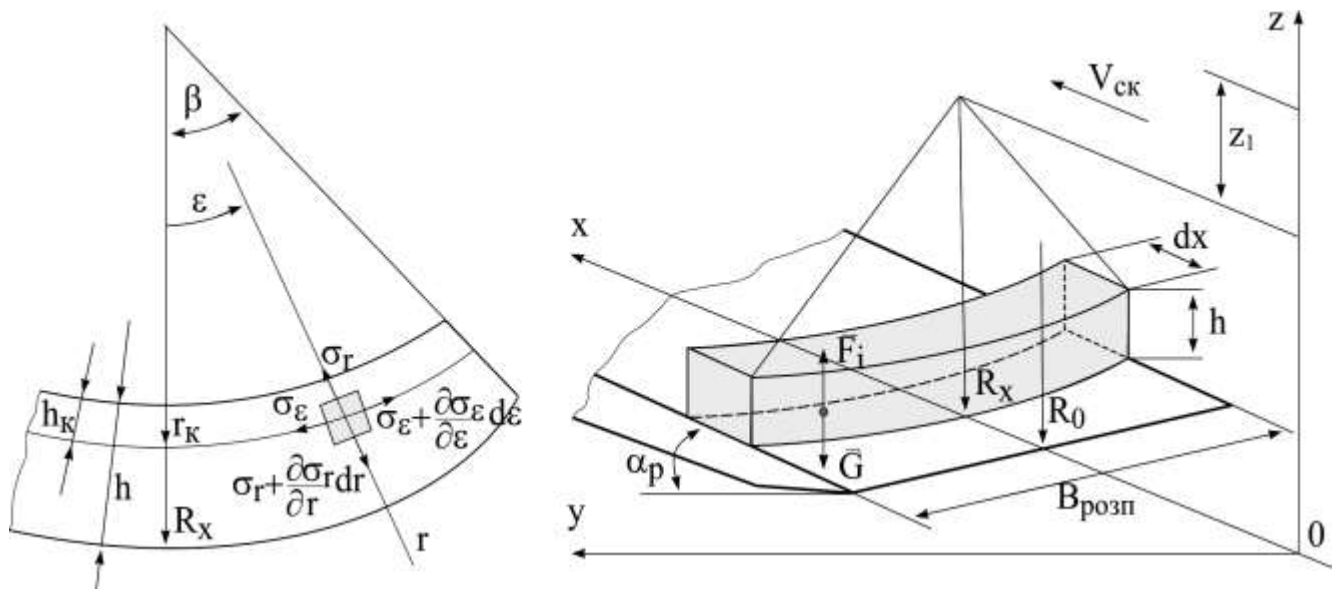


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема для визначення напружено-деформованого стану ґрунтової скиби.

Рівняння умовної рівноваги ґрунтової скиби з урахуванням переносної сили інерції $F_i = m\ddot{z}_1$, що діє на елементарний об'єм ґрунту у вибраній системі координат, має такий вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\epsilon}}{\partial \epsilon} + \frac{\sigma_r - \sigma_\epsilon}{r} + \rho_{\text{ао}} F_r = 0, \\ \frac{\partial \tau_{r\epsilon}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\epsilon}{\partial \epsilon} + \frac{2\tau_{r\epsilon}}{r} + \rho_{\text{ао}} F_\epsilon = 0 \end{cases}, \quad (2.1)$$

де r – біжуче значення радіуса в межах товщини ґрунтової скиби, м;

ϵ – біжуче значення кута ($-\beta \leq \epsilon \leq \beta$), рад;

β – граничний кут дуги перерізу ґрунторозпушувального елемента, рад;

σ_r , σ_ϵ , $\tau_{r\epsilon}$ – компоненти тензора напружень в полярних координатах, Па;

$\rho_{\text{гр}}$ – щільність ґрунту, кг/м³;

F_r та F_ϵ – проекції масових сил на осі r та ϵ , які визначаються залежностями:

$$\begin{cases} F_r = g \cos \alpha_p \cos \varepsilon - \ddot{z}_1 \cos \varepsilon \\ F_\varepsilon = -g \cos \alpha_p \sin \varepsilon + \ddot{z}_1 \sin \varepsilon \end{cases} \quad (2.2)$$

Оскільки, рівняння системи (2.1) містять три складових напруження, то дана задача є статично невизначеною. Тому розв'язок можливий тільки в одному частковому випадку, коли суцільне середовище перебуває в граничному стані, для якого виконується наступна умова:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_r - \sigma_\varepsilon}{2}\right)^2 + \tau_{r\varepsilon}^2} = -\frac{f}{\sqrt{1+f^2}} \frac{\sigma_r + \sigma_\varepsilon}{2}, \quad (2.3)$$

де f – коефіцієнт внутрішнього тертя ґрунту.

У загальному випадку розв'язання рівнянь (2.1) та (2.3) пов'язане зі значними математичними труднощами. На підставі проведених автором експериментів та відповідно до існуючих досліджень [47], вважаємо, що у даному випадку справедливою буде наступна рівність: $\tau_{r\varepsilon} = f \sigma_r + C$,

де C – зчеплення ґрунту, Па.

Аналітичне розв'язання системи (2.1) проводимо, застосовуючи метод прямих [48], на підставі якого проведена заміна часткових похідних розділеними різницями:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = \frac{\sigma_r^k - \sigma_r^{k-1}}{h_k}; \quad \frac{\partial \sigma_\varepsilon}{\partial r} = \frac{\sigma_\varepsilon^k - \sigma_\varepsilon^{k-1}}{h_k} \quad (2.4)$$

Враховуючи (2.4), система (2.1) набере вигляду:

$$\begin{cases} \frac{\sigma_r^{\hat{\varepsilon}} - \sigma_r^{\hat{\varepsilon}-1}}{h_{\hat{\varepsilon}}} + \frac{f}{r_{\hat{\varepsilon}}} \frac{d\sigma_r^{\hat{\varepsilon}}}{d\varepsilon} + \frac{\sigma_r^{\hat{\varepsilon}} - \sigma_{\varepsilon}^{\hat{\varepsilon}}}{r_{\hat{\varepsilon}}} + \rho_{\text{äð}} F_r = 0, \\ f \left(\frac{\sigma_r^{\hat{\varepsilon}} - \sigma_r^{\hat{\varepsilon}-1}}{h_{\hat{\varepsilon}}} \right) + \frac{1}{r_{\hat{\varepsilon}}} \frac{d\sigma_{\varepsilon}^{\hat{\varepsilon}}}{d\varepsilon} + \frac{2(f\sigma_r^{\hat{\varepsilon}} + C)}{r_{\hat{\varepsilon}}} + \rho_{\text{äð}} F_{\varepsilon} = 0 \end{cases}, \quad (2.5)$$

де $h_k = \frac{h}{N}$ - крок зміни радіуса r_k , м; ($k=1, 2 \dots N$);

h – товщина ґрунтової скиби, м.

Помноживши перше рівняння системи (2.5) на r/f , а друге на r , отримаємо:

$$\begin{cases} \frac{d\sigma_r^{\hat{\varepsilon}}}{d\varepsilon} + \frac{\sigma_r^{\hat{\varepsilon}}}{f} \left(\frac{r_{\hat{\varepsilon}}}{h_{\hat{\varepsilon}}} + 1 \right) - \frac{r_{\hat{\varepsilon}}}{f} \frac{\sigma_r^{\hat{\varepsilon}-1}}{h_{\hat{\varepsilon}}} - \frac{\sigma_{\varepsilon}^{\hat{\varepsilon}}}{f} + \frac{r_{\hat{\varepsilon}} \rho_{\text{äð}} F_r}{f} = 0, \\ \frac{d\sigma_{\varepsilon}^{\hat{\varepsilon}}}{d\varepsilon} + f \sigma_r^{\hat{\varepsilon}} \left(\frac{r_{\hat{\varepsilon}}}{h_{\hat{\varepsilon}}} + 2 \right) - \frac{f r_{\hat{\varepsilon}} \sigma_r^{\hat{\varepsilon}-1}}{h_{\hat{\varepsilon}}} + 2C + r_{\hat{\varepsilon}} \rho_{\text{äð}} F_{\varepsilon} = 0 \end{cases}. \quad (2.6)$$

З першого рівняння системи (2.6) знаходимо $d\sigma_r^{\hat{\varepsilon}}/d\varepsilon$:

$$\frac{d\sigma_r^{\hat{\varepsilon}}}{d\varepsilon} = \frac{r_{\hat{\varepsilon}}}{f} \frac{\sigma_r^{\hat{\varepsilon}-1}}{h_{\hat{\varepsilon}}} - \frac{\sigma_r^{\hat{\varepsilon}}}{f} \left(\frac{r_{\hat{\varepsilon}}}{h_{\hat{\varepsilon}}} + 1 \right) + \frac{\sigma_{\varepsilon}^{\hat{\varepsilon}}}{f} - \frac{r_{\hat{\varepsilon}} \rho_{\text{äð}} F_r}{f}. \quad (2.7)$$

Результатом диференціювання за ε другого рівняння системи (2.6) є:

$$\frac{d^2 \sigma_{\varepsilon}^{\hat{\varepsilon}}}{d\varepsilon^2} + \frac{d\sigma_r^{\hat{\varepsilon}}}{d\varepsilon} f \left(\frac{r_{\hat{\varepsilon}}}{h_{\hat{\varepsilon}}} + 2 \right) - \frac{d\sigma_r^{\hat{\varepsilon}-1}}{d\varepsilon} \frac{f r_{\hat{\varepsilon}}}{h_{\hat{\varepsilon}}} + \frac{r_{\hat{\varepsilon}} \rho_{\text{äð}} F_{\varepsilon}}{d\varepsilon} = 0. \quad (2.8)$$

Підставляючи рівняння (2.7) в (2.8), отримаємо:

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 \sigma_\varepsilon^{\hat{e}}}{d\varepsilon^2} + \left[\frac{r}{f} \frac{\sigma_r^{\hat{e}-1}}{h_{\hat{e}}} - \frac{\sigma_r^{\hat{e}}}{f} \left(\frac{r}{h_{\hat{e}}} + 1 \right) + \frac{\sigma_\varepsilon^{\hat{e}}}{f} - \frac{r_{\hat{e}} \rho_{\tilde{a}\tilde{b}} F_r}{f} \right] f \left(\frac{r_{\hat{e}}}{h_{\hat{e}}} + 2 \right) - \\ & - \frac{d\sigma_r^{\hat{e}-1}}{d\varepsilon} \frac{f r_{\hat{e}}}{h_{\hat{e}}} + r_{\hat{e}} \rho_{\tilde{a}\tilde{b}} \frac{dF_\varepsilon}{d\varepsilon} = 0. \end{aligned} \quad (2.9)$$

З другого рівняння системи (2.6) визначимо σ_r^k :

$$\sigma_r^{\hat{e}} = \frac{\frac{f r_{\hat{e}} \sigma_r^{\hat{e}-1}}{h_{\hat{e}}} - r_{\hat{e}} \rho_{\tilde{a}\tilde{b}} F_\varepsilon - \frac{d\sigma_\varepsilon^{\hat{e}}}{d\varepsilon} - 2C}{f \left(\frac{r_{\hat{e}}}{h_{\hat{e}}} + 2 \right)}. \quad (2.10)$$

Вираз (2.9), з урахуванням (2.10), набере наступного вигляду:

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 \sigma_\varepsilon^{\hat{e}}}{d\varepsilon^2} + \left[\frac{r_{\hat{e}}}{f} \frac{\sigma_r^{\hat{e}-1}}{h_{\hat{e}}} - \frac{1}{f^2} \left(\frac{f r_{\hat{e}} \sigma_r^{\hat{e}-1}}{h_{\hat{e}}} - r_{\hat{e}} \rho_{\tilde{a}\tilde{b}} F_\varepsilon - \frac{d\sigma_\varepsilon^{\hat{e}}}{d\varepsilon} - 2C \right) \frac{\left(\frac{r_{\hat{e}}}{h_{\hat{e}}} + 1 \right)}{\left(\frac{r_{\hat{e}}}{h_{\hat{e}}} + 2 \right)} + \frac{\sigma_\varepsilon^{\hat{e}}}{f} - \frac{r_{\hat{e}} \rho_{\tilde{a}\tilde{b}} F_r}{f} \right] \times \\ & \times f \left(\frac{r_{\hat{e}}}{h_{\hat{e}}} + 2 \right) - \frac{d\sigma_r^{\hat{e}-1}}{d\varepsilon} \frac{f r_{\hat{e}}}{h_{\hat{e}}} + \frac{r_{\hat{e}} \rho_{\tilde{a}\tilde{b}} dF_\varepsilon}{d\varepsilon} = 0. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Відповідно до другого рівняння системи (2.2) запишемо, що:

$$\frac{dF_\varepsilon}{d\varepsilon} = -g \cos \alpha_p \cos \varepsilon + \ddot{z}_1 \cos \varepsilon = \cos \varepsilon (\ddot{z}_1 - g \cos \alpha_p). \quad (2.12)$$

Після проведених перетворень виразу (2.11) та з урахуванням (2.12), отримаємо систему диференціальних рівнянь другого порядку:

$$\frac{d^2\sigma_{\varepsilon}^{\hat{\varepsilon}}}{d\varepsilon^2} + p \frac{d\sigma_{\varepsilon}^{\hat{\varepsilon}}}{d\varepsilon} + q\sigma_{\varepsilon}^{\hat{\varepsilon}} = A \sin \varepsilon + B \cos \varepsilon + D, \quad (2.13)$$

$$де \quad p = \frac{1}{f} \left(\frac{r_{\hat{\varepsilon}}}{h_{\hat{\varepsilon}}} + 1 \right); \quad q = \left(\frac{r_{\hat{\varepsilon}}}{h_{\hat{\varepsilon}}} + 2 \right);$$

$$A = -\frac{1}{f} \left(\frac{r_{\hat{\varepsilon}}}{h_{\hat{\varepsilon}}} + 1 \right) \rho_{\tilde{a}\tilde{o}} r_{\hat{\varepsilon}} (\ddot{z}_1 - g \cos \alpha_p);$$

$$B = -\left(\frac{r_{\hat{\varepsilon}}}{h_{\hat{\varepsilon}}} + 3 \right) \rho_{\tilde{a}\tilde{o}} r_{\hat{\varepsilon}} (\ddot{z}_1 - g \cos \alpha_p);$$

$$D = f \frac{r_{\hat{\varepsilon}}}{h_{\hat{\varepsilon}}} \frac{d\sigma_r^{\hat{\varepsilon}-1}}{d\varepsilon} - \frac{r_{\hat{\varepsilon}}}{h_{\hat{\varepsilon}}} \sigma_r^{\hat{\varepsilon}-1} - 2C \left(\frac{r_{\hat{\varepsilon}}}{h_{\hat{\varepsilon}}} + 1 \right).$$

Розв'язок рівняння (2.13) включає загальний та частковий, а саме:

$$\sigma_{\varepsilon}^{\hat{\varepsilon}} = (\overline{\sigma}_{\varepsilon}^{\hat{\varepsilon}}) + (\widetilde{\sigma}_{\varepsilon}^{\hat{\varepsilon}}). \quad (2.14)$$

Загальний розв'язок (2.13) отримаємо розв'язуючи однорідне диференціальне рівняння:

$$\frac{d^2\sigma_{\varepsilon}^{\hat{\varepsilon}}}{d\varepsilon^2} + p \frac{d\sigma_{\varepsilon}^{\hat{\varepsilon}}}{d\varepsilon} + q\sigma_{\varepsilon}^{\hat{\varepsilon}} = 0. \quad (2.15)$$

Запишемо характеристичне рівняння $\hat{\varepsilon}^2 + p\hat{\varepsilon} + q = 0$, корені якого дорівнюють:

$$\hat{\varepsilon}_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\frac{p^2}{4} - q}.$$

Проаналізувавши вирази для p і q , прийшли до висновку, що корені дійсні та різні. Тоді загальний розв'язок матиме вигляд:

$$\overline{\sigma}_\varepsilon^{\hat{e}} = C_1 \hat{a}^{\hat{e}_1 \varepsilon} + C_2 \hat{a}^{\hat{e}_2 \varepsilon}. \quad (2.16)$$

Окремий розв'язок шукаємо методом варіації довільних сталих, як:

$$\tilde{\sigma}_\varepsilon^{\hat{e}} = C_1(\varepsilon) e^{\hat{e}_1 \varepsilon} + C_2(\varepsilon) e^{\hat{e}_2 \varepsilon}, \quad (2.17)$$

де $C_1(\varepsilon)$ і $C_2(\varepsilon)$ є деякі функції від ε .

Диференціюючи рівняння (2.17), отримаємо:

$$\frac{d\tilde{\sigma}_\varepsilon^{\hat{e}}}{d\varepsilon} = \frac{dC_1(\varepsilon)}{d\varepsilon} e^{\hat{e}_1 \varepsilon} + C_1(\varepsilon) \hat{e}_1 e^{\hat{e}_1 \varepsilon} + \frac{dC_2(\varepsilon)}{d\varepsilon} e^{\hat{e}_2 \varepsilon} + C_2(\varepsilon) \hat{e}_2 e^{\hat{e}_2 \varepsilon}; \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \tilde{\sigma}_\varepsilon^{\hat{e}}}{d\varepsilon^2} = & \frac{d^2 C_1(\varepsilon)}{d\varepsilon^2} e^{\hat{e}_1 \varepsilon} + \frac{dC_1(\varepsilon)}{d\varepsilon} \hat{e}_1 e^{\hat{e}_1 \varepsilon} + \frac{dC_1(\varepsilon)}{d\varepsilon} \hat{e}_1 e^{\hat{e}_1 \varepsilon} + C_1(\varepsilon) \hat{e}_1^2 e^{\hat{e}_1 \varepsilon} + \frac{dC_2(\varepsilon)}{d\varepsilon^2} e^{\hat{e}_2 \varepsilon} + \\ & + \frac{dC_2(\varepsilon)}{d\varepsilon} \hat{e}_2 e^{\hat{e}_2 \varepsilon} + \frac{dC_2(\varepsilon)}{d\varepsilon} \hat{e}_2 e^{\hat{e}_2 \varepsilon} + C_2(\varepsilon) \hat{e}_2^2 e^{\hat{e}_2 \varepsilon}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Підставляючи отримані значення (2.18) і (2.19) в диференціальне рівняння (2.13) та провівши деякі перетворення, отримаємо:

$$\frac{dC_1(\varepsilon)}{d\varepsilon} \hat{e}_1 e^{\hat{e}_1 \varepsilon} + \frac{dC_2(\varepsilon)}{d\varepsilon} \hat{e}_2 e^{\hat{e}_2 \varepsilon} = A \sin \varepsilon + B \cos \varepsilon + D. \quad (2.20)$$

Крім того, підберемо функції $C_1(\varepsilon)$ і $C_2(\varepsilon)$ таким чином, щоб виконувалась умова:

$$\frac{dC_1(\varepsilon)}{d\varepsilon} e^{\hat{e}_1 \varepsilon} + \frac{dC_2(\varepsilon)}{d\varepsilon} e^{\hat{e}_2 \varepsilon} = 0. \quad (2.21)$$

Знаходимо $C_1(\varepsilon)$ і $C_2(\varepsilon)$, розв'язуючи рівняння (2.20) та (2.21). В результаті проведених математичних перетворень отримаємо:

$$\frac{dC_2(\varepsilon)}{d\varepsilon} = \frac{A \sin \varepsilon + B \cos \varepsilon + D}{e^{\hat{e}_2 \varepsilon} (\hat{e}_2 - \hat{e}_1)}. \quad (2.22)$$

Інтегруючи останнє, отримаємо:

$$C_2(\varepsilon) = \frac{e^{-\hat{e}_2 \varepsilon}}{\hat{e}_2 - \hat{e}_1} \left[\frac{\hat{A}}{\hat{e}_2^2 + 1} (-\hat{e}_2 \sin \varepsilon - \cos \varepsilon) + \frac{\hat{A}}{\hat{e}_2^2 + 1} (-\hat{e}_2 \cos \varepsilon + \sin \varepsilon) - \frac{D}{\hat{e}_2} \right]. \quad (2.23)$$

Аналогічним чином знаходимо $C_1(\varepsilon)$:

$$C_1(\varepsilon) = \frac{e^{-\hat{e}_1 \varepsilon}}{\hat{e}_1 - \hat{e}_2} \left[\frac{\hat{A}}{\hat{e}_1^2 + 1} (-\hat{e}_1 \sin \varepsilon - \cos \varepsilon) + \frac{\hat{A}}{\hat{e}_1^2 + 1} (-\hat{e}_1 \cos \varepsilon + \sin \varepsilon) - \frac{D}{\hat{e}_1} \right]. \quad (2.24)$$

Внаслідок того, що радіальні напруження на поверхні ґрунтової скиби відсутні, то для першого шару $\sigma_r^{\hat{e}-1} = 0$ та $d\sigma_r^{\hat{e}-1}/d\varepsilon = 0$. Враховуючи останнє та підставляючи $C_1(\varepsilon)$ і $C_2(\varepsilon)$ в рівняння (2.17), отримаємо остаточний вираз для визначення напружень $\sigma_\varepsilon^{\hat{e}}$:

$$\sigma_\varepsilon^{\hat{e}} = C_1 e^{\hat{e}_1 \varepsilon} + \tilde{N}_2 e^{\hat{e}_2 \varepsilon} + A_1 \sin \varepsilon + B_1 \cos \varepsilon + D_1, \quad (2.25)$$

$$\text{де } A_1 = \frac{B - \hat{e}_1 \hat{A}}{(\hat{e}_1 - \hat{e}_2)(\hat{e}_1^2 + 1)} + \frac{\hat{A} - \hat{e}_2 \hat{A}}{(\hat{e}_2 - \hat{e}_1)(\hat{e}_2^2 + 1)};$$

$$B_1 = \frac{A + \hat{e}_1 B}{(\hat{e}_2 - \hat{e}_1)(\hat{e}_1^2 + 1)} + \frac{A + \hat{e}_2 B}{(\hat{e}_1 - \hat{e}_2)(\hat{e}_2^2 + 1)};$$

$$D_1 = \frac{D}{\hat{e}_1 \hat{e}_2}.$$

Сталі інтегрування визначаємо з граничних умов $\sigma_\varepsilon^k|_{\varepsilon=\pm\beta} = 0$, підставляючи їх у вираз (2.25), а саме:

$$\begin{cases} C_1 e^{\hat{\varepsilon}_1 \beta} + C_2 e^{\hat{\varepsilon}_2 \beta} + A_1 \sin \beta + B_1 \cos \beta + D_1 = 0, \\ C_1 e^{-\hat{\varepsilon}_1 \beta} + C_2 e^{-\hat{\varepsilon}_2 \beta} + A_1 \sin(-\beta) + B_1 \cos(-\beta) + D_1 = 0. \end{cases} \quad (2.26)$$

Помноживши друге рівняння системи (2.26) на $e^{2\hat{\varepsilon}_1 \beta}$ та віднімаючи від першого друге, отримаємо:

$$C_2 = \frac{[(A_1 \sin \beta - B_1 \cos \beta - D_1) e^{2\hat{\varepsilon}_1 \beta} - (A_1 \sin \beta + B_1 \cos \beta + D_1)] e^{\hat{\varepsilon}_2 \beta}}{e^{2\hat{\varepsilon}_2 \beta} - e^{2\hat{\varepsilon}_1 \beta}}. \quad (2.27)$$

Аналогічно знаходимо C_1 :

$$C_1 = \frac{[(A_1 \sin \beta - B_1 \cos \beta - D_1) e^{2\hat{\varepsilon}_2 \beta} - (A_1 \sin \beta + B_1 \cos \beta + D_1)] e^{\hat{\varepsilon}_1 \beta}}{e^{2\hat{\varepsilon}_1 \beta} - e^{2\hat{\varepsilon}_2 \beta}}. \quad (2.28)$$

Тоді, враховуючи (2.25), рівняння (2.10) матиме вигляд:

$$\sigma_r^{\hat{\varepsilon}} = \frac{f \frac{r_{\hat{\varepsilon}}}{h_{\hat{\varepsilon}}} \sigma_r^{\hat{\varepsilon}-1} - (\ddot{z}_1 - g \cos \alpha_p) \rho_{\text{ад}} \frac{r_{\hat{\varepsilon}}}{f} \cos \varepsilon - 2C - \tilde{N}_1 \hat{\varepsilon}_1 e^{\hat{\varepsilon}_1 \varepsilon} - \tilde{N}_2 \hat{\varepsilon}_2 e^{\hat{\varepsilon}_2 \varepsilon} - A_1 \cos \varepsilon - B_1 \sin \varepsilon}{f \left(\frac{r_{\hat{\varepsilon}}}{h_{\hat{\varepsilon}}} + 2 \right)}. \quad (2.29)$$

Аналізуючи значення коефіцієнта D у виразі (2.13), для даних умов розпушення ґрунтової скиби отримуємо:

$$\frac{f \frac{r_{\hat{\varepsilon}}}{h_{\hat{\varepsilon}}} \frac{d\sigma_r^{\hat{\varepsilon}-1}}{d\varepsilon} - \frac{r_{\hat{\varepsilon}}}{h_{\hat{\varepsilon}}} \sigma_r^{\hat{\varepsilon}-1}}{f \frac{r_{\hat{\varepsilon}}}{h_{\hat{\varepsilon}}} \frac{d\sigma_r^{\hat{\varepsilon}-1}}{d\varepsilon} - \frac{r_{\hat{\varepsilon}}}{h_{\hat{\varepsilon}}} \sigma_r^{\hat{\varepsilon}-1} - 2C \left(\frac{r_{\hat{\varepsilon}}}{h_{\hat{\varepsilon}}} + 1 \right)} 100\% = 6...11\% .$$

Враховуючи це, вважаємо, що коефіцієнт D практично не залежить від координати ε . Тому вирази (2.25) і (2.29) справедливі не тільки для першого, а й для другого та наступних шарів ґрунтової скиби. В іншому випадку формули розрахунку σ_{ε}^k і σ_r^k ($k=2...N$) набувають громіздкого вигляду, що веде до неможливості їх практичного застосування.

Задаючись певним кроком h_k зміни r_k , шар за шаром, проводимо розрахунки напружень σ_{ε}^k і σ_r^k ($k=1...N$). Очевидно, що при деякому значенні r_k , за умови $\sigma_{\varepsilon}^k > [\sigma_{\text{роз}}]$ відбудеться руйнування ґрунту. Характер зміни $\sigma_{\varepsilon}^k = f(x)$ для скиби суглинку напівтвердого ($C=0,04\text{МПа}$, $\rho_{\text{гр}}=1700\text{кг/м}^3$) товщиною $h=0,16\text{м}$ наведений на рис. 2.2.

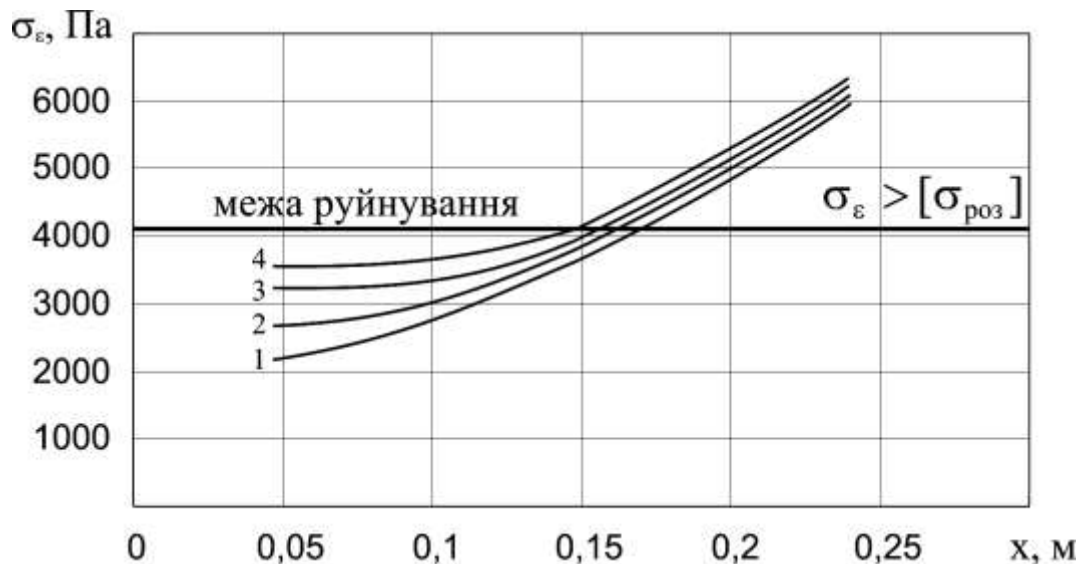


Рисунок 2.2 – Залежність напружень розтягу нижнього шару ґрунтової скиби від зміни R_x вздовж осі x : 1 – $V_{\text{ск}}=0,05\text{м/с}$; 2 – $V_{\text{ск}}=0,1\text{м/с}$; 3 – $V_{\text{ск}}=0,15\text{м/с}$; 4 – $V_{\text{ск}}=0,2\text{м/с}$.

З рис. 2.2 видно, що для заданих геометричних параметрів ґрунтової скиби суттєвий вплив на напруження розтягу здійснює зміна радіуса R_x вздовж осі x , за яким вона деформується. Руйнування скиби відбувається при $x=0,14\dots0,17$ м, коли напруження розтягу її нижнього шару досягають гранично допустимих значень, за радіуса $R_x=0,4\dots0,3$ м. Очевидно, що наступне зменшення радіуса R_x призведе до подальшого руйнування скиби ґрунту. Оскільки аналітичний опис напруженого стану зруйнованих навпів елементів скиби досить складний, то раціональне значення радіуса вихідного перерізу транспортувальної поверхні, яке забезпечуватиме необхідні розміри ґрунтових агрегатів, буде встановлено експериментально.

Виходячи з вище наведеного, можна зазначити те, що для забезпечення процесу подрібнення скиби ґрунту доцільним є використання транспортувальної поверхні радіус поперечних перерізів якої буде зменшуватись за напрямом руху ґрунту.

2.3. Обґрунтування форми транспортувальної поверхні ґрунторозпушувального елемента

З метою встановлення раціональних параметрів транспортувальної поверхні, що забезпечуватиме процес розпушення ґрунтової скиби за рахунок змінного радіуса поперечних перерізів, розроблялась її математична модель. Поверхня розглядалась у просторовій системі координат x y z як сукупність твірних L_t у вигляді прямих ліній. Оскільки форма досліджуваної поверхні є симетричною відносно площини $x=0$ z , то для спрощення аналізу розглянемо її праву частину (рис. 2.3).

Позначимо довжину ґрунторозпушувального елемента через величину L , ширину ріжучої частини через b , в межах якої знаходиться змінний параметр t , та будемо вважати, що функції $y = \varphi_R(u)$ і $z = \psi_R(u)$ параметрично описують криву на тильній частині досліджуваної поверхні.

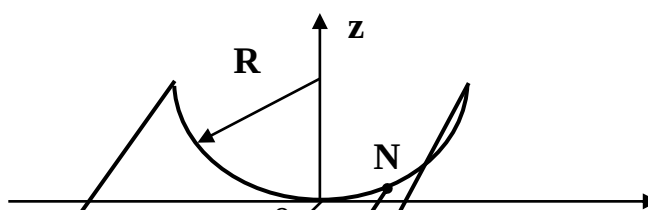


Рисунок 2.3 – Схема транспортувальної поверхні ґрунторозпушувального елемента.

Розглянемо довільне положення твірної в деякому проміжному значенні t . Тоді, $M(L; t; 0)$ і $N(0; \varphi_R(u); \psi_R(u))$ - дві точки з відповідними координатами, які лежать на ній. Закон відповідності між даними точками виразимо через довільну функцію, а саме $u = f(t)$,

(2.30)

де $f(t)$ – неперервна та монотонно зростаюча на відрізку $[0; b]$ функція (рис. 2.3), $f(0)=0$.

Рівняння прямої, що проходить через дві точки із заданими координатами, має вигляд:

$$\frac{x-L}{-L} = \frac{y-t}{\varphi_R(u)-t} = \frac{z}{\psi_R(u)}, \quad \text{для } 0 \leq t \leq b. \quad (2.31)$$

Оскільки досліджувана поверхня є об'єднанням твірних, то буде справедливим наступне рівняння:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{x-L}{-L} = \frac{y-t}{\varphi_R(u)-t}, \\ \frac{x-L}{-L} = \frac{z}{\psi_R(u)} \end{array} \right. . \quad (2.32)$$

Для спрощення розрахунків позначимо
$$\frac{x-L}{-L} = \frac{L-x}{L} = X, \quad (2.33)$$

де $0 \leq x \leq L$, або $0 \leq X \leq 1$. (2.34)

Таким чином:

$$\begin{cases} X = \frac{y-t}{\varphi_R(u)-t}, \\ X = \frac{z}{\psi_R(u)}. \end{cases} \quad (2.35)$$

Виразимо із системи (2.35) параметр t . Для цього запишемо, що $\psi_R(u) = \frac{z}{X}$, де $\psi_R(u)$, функція монотонно зростаюча на $[0, f(b)]$. Оскільки, вказана функція є такою, то існує обернена їй функція $\psi_R^{-1}(u)$, тобто:

$$\psi_R^{-1}(\psi_R(u)) = \psi_R^{-1}\left(\frac{z}{X}\right), \text{ звідки } u = \psi_R^{-1}\left(\frac{z}{X}\right). \quad (2.36)$$

Якщо взяти до уваги вираз (2.14), то останнє рівняння набере вигляду:

$$f(t) = \psi_R^{-1}\left(\frac{z}{X}\right), \quad (2.37)$$

звідки
$$t = f^{-1}\left(\psi_R^{-1}\left(\frac{z}{X}\right)\right).$$

(2.38)

Підставивши значення (2.38) в перше рівняння системи (2.35), отримаємо рівняння правої половини досліджуваної поверхні:

$$X = \frac{y - f^{-1}(\psi_R^{-1}(\frac{z}{X}))}{\frac{\varphi_R(\psi_R^{-1}(\frac{z}{X})) - f^{-1}(\psi_R^{-1}(\frac{z}{X}))}{X}}. \quad (2.39)$$

Рівномірне деформування ґрунтової скиби в межах поперечного перерізу транспортувальної поверхні буде забезпечуватись за умови:

$$\begin{cases} y = R \sin u, \\ z = R - R \cos u. \end{cases} \quad (2.40)$$

Таким чином,

$$\begin{aligned} \varphi_R(u) &= R \sin u, \\ \psi_R(u) &= R - R \cos u. \end{aligned} \quad (2.41)$$

В силу висловленого вище припущення щодо функції $\psi_R(u)$, маємо умову

$$0 \leq f(b) \leq \pi. \quad (2.42)$$

Поклавши, що $\tau_R = \psi_R(u)$, отримаємо:

$$\tau_R = R - R \cos u, \quad \text{звідки} \quad u = \arccos\left(1 - \frac{\tau_R}{R}\right). \quad (2.43)$$

Отже, обернена функція запишеться у вигляді:

$$u = \arccos\left(1 - \frac{\tau_R}{R}\right); \quad \psi_R^{-1}\left(\frac{z}{X}\right) = \arccos\left(1 - \frac{z}{RX}\right) \quad (2.44)$$

Запишемо на основі ще одного припущення функцію відповідності між точками М та N у вигляді: $f(t) = \omega_1 t$, (2.45)

де ω_1 - коефіцієнт пропорційності.

Враховуючи (2.45), умову (2.42) можна записати у вигляді:

$$0 \leq \omega_1 b \leq \frac{\pi}{2}, \quad \text{звідки} \quad 0 \leq \omega_1 \leq \frac{\pi}{2b}. \quad (2.46)$$

На підставі вище наведених викладок отримаємо рівняння шуканої поверхні:

$$X = \frac{y - \frac{1}{\omega_1} \psi_R^{-1}\left(\frac{z}{X}\right)}{R \sin\left(\psi_R^{-1}\left(\frac{z}{X}\right)\right) - \frac{1}{\omega_1} \left(\psi_R^{-1}\left(\frac{z}{X}\right)\right)}, \text{ або}$$

$$X = \frac{\omega_1 y - \arccos\left(1 - \frac{z}{R X}\right)}{\omega_1 R \sin\left(\arccos\left(1 - \frac{z}{R X}\right)\right) - \arccos\left(1 - \frac{z}{R X}\right)}. \quad (2.47)$$

$$\text{Оскільки } \sin \arccos X = \sqrt{1 - X^2}, \text{ то } \sin\left(\arccos\left(1 - \frac{z}{R X}\right)\right) = \sqrt{\frac{2z}{R X} - \frac{z^2}{R^2 X^2}}.$$

Тоді рівняння (2.47) запишемо, як:

$$X = \frac{\omega_1 y - \arccos\left(1 - \frac{z}{R X}\right)}{\omega_1 \sqrt{2RXz - z^2} - X \arccos\left(1 - \frac{z}{R X}\right)} X, \text{ або}$$

$$y = \sqrt{2RXz - z^2} + \frac{1 - X}{\omega_1} \arccos\left(1 - \frac{z}{R X}\right). \quad (2.48)$$

Враховуючи спрощення (2.33), маємо остаточне рівняння шуканої поверхні:

$$y = \sqrt{\frac{2Rz(L-x)}{L} - z^2} + \frac{x}{L\omega_1} \arccos\left(1 - \frac{Lz}{R(L-x)}\right). \quad (2.49)$$

Розглянемо переріз цієї поверхні площиною $x = \text{const}$. Рівняння зазначеного перерізу буде аналогічним рівнянню площини (2.49) при підстановці в нього сталої величини X . Кривизна в точці (x, y, z) цього перерізу ($x \equiv \text{const}$) дорівнює [16]:

$$K = \frac{\omega_1^2 |R^2 X^2 \omega_1 + R X (1-X) - (1-X)z|}{\left[(R X \omega_1 + 1 - X)^2 - 2(1-X)\omega_1 z\right]^{\frac{3}{2}}}. \quad (2.50)$$

Враховуючи (2.33), можна записати, що:

$$1 - X = 1 - 1 + \frac{x}{L} = \frac{x}{L}. \quad (2.51)$$

Тоді вираз для кривизни перерізу набере вигляду:

$$K = \frac{L\omega_1^2 |R^2(L-x)^2\omega_1 + R x (L-x) - L x z|}{\left[(R(L-x)\omega_1 + x)^2 - 2L x \omega_1 z\right]^{\frac{3}{2}}}. \quad (2.52)$$

З метою подальшого вивчення кривизни введемо позначення:

$$\begin{aligned} A_2 &= L\omega_1^2 [R^2(L-x)^2\omega_1 + Rx(L-x)]; & B_2 &= L^2 x \omega_1^2; \\ Q_2 &= R(L-x)\omega_1 + x; & D_2 &= 2L x \omega_1. \end{aligned} \quad (2.53)$$

Розглянемо функцію
$$F(z) = \frac{A_2 - B_2 z}{[Q_2^2 - D_2 z]^{\frac{3}{2}}},$$

де $z \geq 0$.

Тоді кривизна запишеться у вигляді: $K = |F(z)|$.

Знайдемо верхню межу зміни z при фіксованому x . Маємо:

$$\begin{aligned} z &= X \psi(u) = X \psi(f(t)) \leq X \psi(f(b)) = X \psi(\omega_1 b) = \\ &= 2 X R \sin^2 \frac{\omega_1 b}{2} = 2 R \frac{L-x}{L} \sin^2 \frac{\omega_1 b}{2} = \alpha_x. \end{aligned} \quad (2.54)$$

Таким чином, для перерізу $x = x \equiv \text{const}$:

$$0 \leq z \leq \alpha_x = 2R \frac{L-x}{L} \sin^2 \frac{\omega_1 b}{2}. \quad (2.55)$$

Розкладемо функцію $F(z)$ за формулою Тейлора [16] в околі точки $z_0 = 0$ при $n = 1$:

$$F(z) = F(0) + \frac{F'(0)}{1!} z + \frac{F''(\theta)}{2!} z^2, \quad (2.56)$$

де $0 < \theta < z$.

Складові виразу (2.56) приймуть наступний вигляд: $F(0) = \frac{A_2}{C_2^3};$

$$\begin{aligned} F'(z) &= \frac{\frac{3}{2} A_2 D_2 - B_2 Q_2^2 - \frac{1}{2} B_2 D_2}{[Q_2^2 - D_2 z]^{\frac{5}{2}}}; \\ F''(z) &= \frac{-3B_2 D_2 Q_2^2 + \frac{15}{4} A_2 D_2^2 - \frac{3}{4} B_2 D_2^2 z}{[Q_2^2 - D_2 z]^{\frac{7}{2}}}. \end{aligned} \quad (2.57)$$

Таким чином, підставляючи значення складових (2.57) у вираз (2.56) та враховуючи заміну (2.53), отримаємо значення шуканої функції:

$$F(z) = \frac{R L \omega_1^2 (L-x)}{[R(L-x)\omega_1 + x]^2} + \frac{L^2 \omega_1^2 x [2R(L-x)\omega_1 - x]}{[R(L-x)\omega_1 + x]^4} z + r_1(z). \quad (2.58)$$

Для отримання на виході з транспортувальної поверхні однорідного продукту розпушення (агрегатів однакових розмірів) необхідно забезпечити однакове деформування ґрунтової скиби в поперечному перерізі за його висотою, тобто, щоб поперечні перерізи описувалися кривими сталої кривизни (дугами кіл).

В той же час, вираз (2.58) показує, що кривизна поперечних перерізів досліджуваної поверхні має змінне значення за висотою ґрунторозпушувального елемента. Найбільший вплив z на зміну кривизни визначає коефіцієнт другого члена ряду (2.58), який позначимо через k_z . Третій член цього ряду впливає на зміну кривизни не значно і тому ним можна знехтувати.

Для мінімізації зміни кривизни необхідно було визначити вплив інших параметрів транспортувальної поверхні на коефіцієнт k_z . Задача вирішувалася на ПЕОМ завдяки визначенню k_z для поперечних перерізів $x=5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50\text{мм}$. Результати досліджень наведені на рисунках 2.4 - 2.7 у вигляді графічних залежностей.

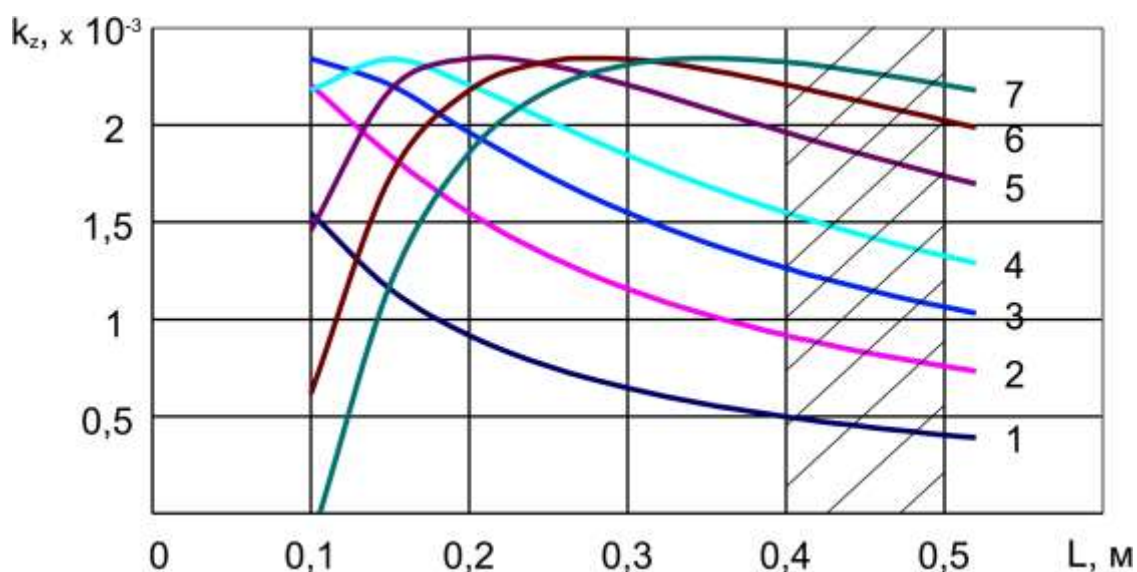


Рисунок 2.4 – Залежність коефіцієнта k_z від довжини транспортувальної поверхні ($R=0,1\text{м}$; $\omega_1=0,046\text{рад/см}$):

1 – $x=5\text{мм}$; 2 – $x=10\text{мм}$; 3 – $x=15\text{мм}$; 4 – $x=20\text{мм}$; 5 – $x=30\text{мм}$; 6 – $x=40\text{мм}$; 7 – $x=50\text{мм}$.

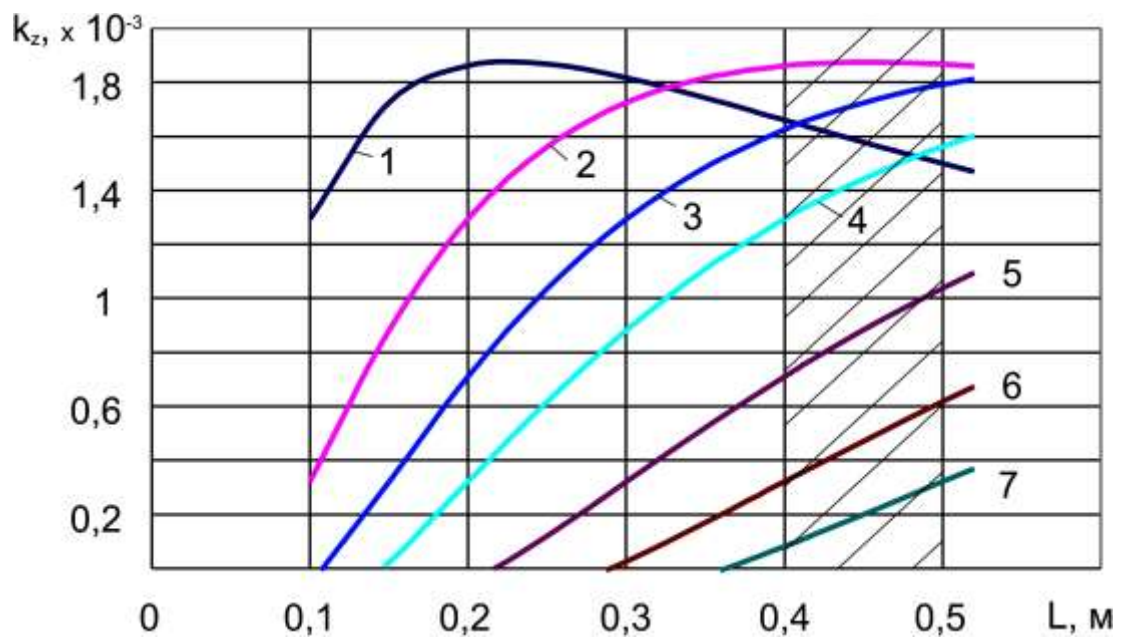


Рисунок 2.5 – Залежність коефіцієнта k_z від довжини транспортувальної поверхні ($R=0,1\text{м}$; $\omega_1=0,008\text{рад/см}$):

1– $x=5\text{мм}$; 2– $x=10\text{мм}$; 3– $x=15\text{мм}$; 4– $x=20\text{мм}$; 5– $x=30\text{мм}$; 6– $x=40\text{мм}$; 7– $x=50\text{мм}$.

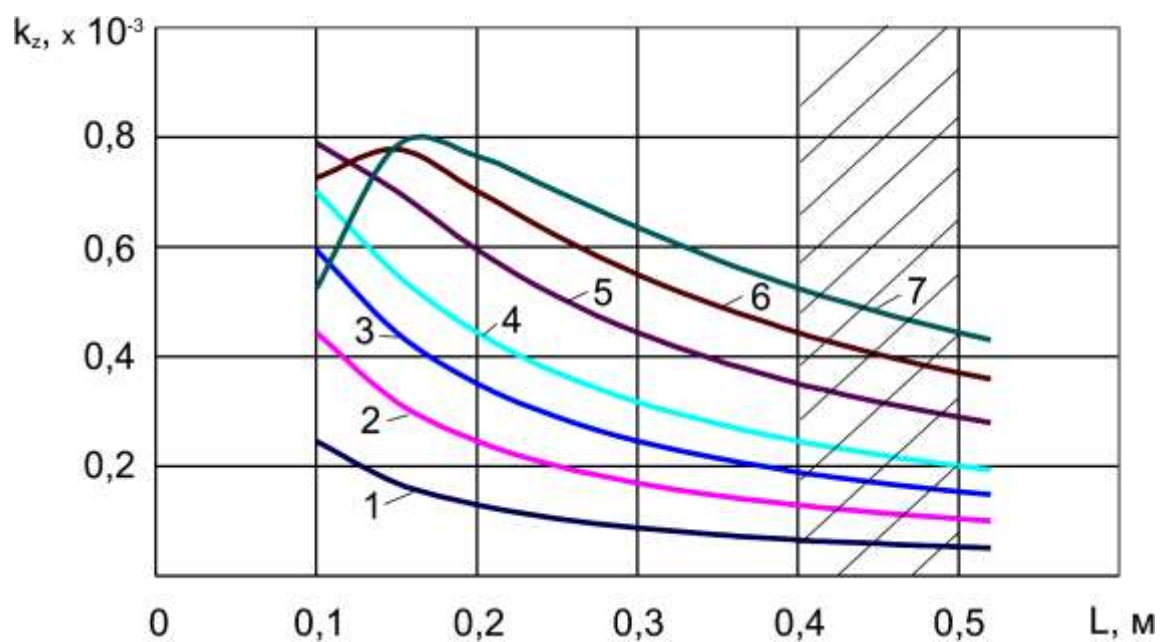


Рисунок 2.6 – Залежність коефіцієнта k_z від довжини транспортувальної поверхні ($R=0,2\text{м}$; $\omega_1=0,046\text{рад/см}$):

1– $x=5\text{мм}$; 2– $x=10\text{мм}$; 3– $x=15\text{мм}$; 4– $x=20\text{мм}$; 5– $x=30\text{мм}$; 6– $x=40\text{мм}$; 7– $x=50\text{мм}$.

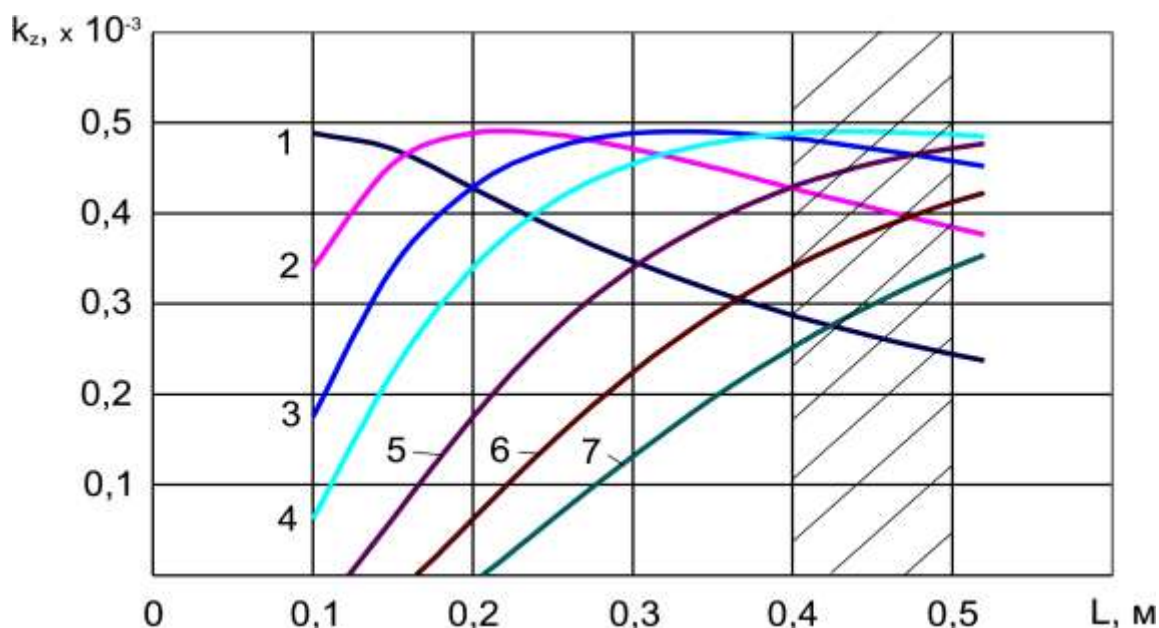


Рисунок 2.7 – Залежність коефіцієнта k_z від довжини транспортувальної поверхні ($R=0,2\text{м}$; $\omega_1=0,008\text{рад/см}$):

1– $x=5\text{мм}$; 2– $x=10\text{мм}$; 3– $x=15\text{мм}$; 4– $x=20\text{мм}$; 5– $x=30\text{мм}$; 6– $x=40\text{мм}$; 7– $x=50\text{мм}$.

Наведені графічні залежності показують характер зміни значень коефіцієнта k_z в залежності від довжини ґрунторозпушувального елемента для різних x , за максимального та мінімального ω_1 . Так, видно, що для значення вихідного радіуса транспортувальної поверхні $R=0,1\text{м}$ (рис. 2.4, 2.5) максимальна величина k_z в середньому у 3 рази більша ніж для поверхні із $R=0,2\text{м}$ (рис. 2.6, 2.7). Щодо коефіцієнта ω_1 , то раціональним є його максимальне значення ($\omega_1=0,046\text{рад/см}$), оскільки при цьому величина k_z монотонно зменшується (рис. 2.4, 2.6) для всіх досліджуваних поперечних перерізів транспортувальної поверхні зі збільшенням її довжини. Збільшення довжини є доцільним до $L=0,4\ldots 0,5\text{м}$, бо надалі інтенсивність зміни кривизни за висотою поперечних перерізів цієї поверхні є незначною. Тому, для інженерних розрахунків рекомендовано приймати довжину транспортувальної поверхні в межах $0,4\ldots 0,5\text{м}$, що дозволяє запобігти необґрунтованому збільшенню опору переміщенню ґрунтової скиби по даній поверхні.

Зміна величини радіуса вихідного перерізу також впливає на зміну форми досліджуваної поверхні. Так, графічна залежність коефіцієнта k_z від вказаного радіуса R для різних значень x зображена на рисунку 2.8.

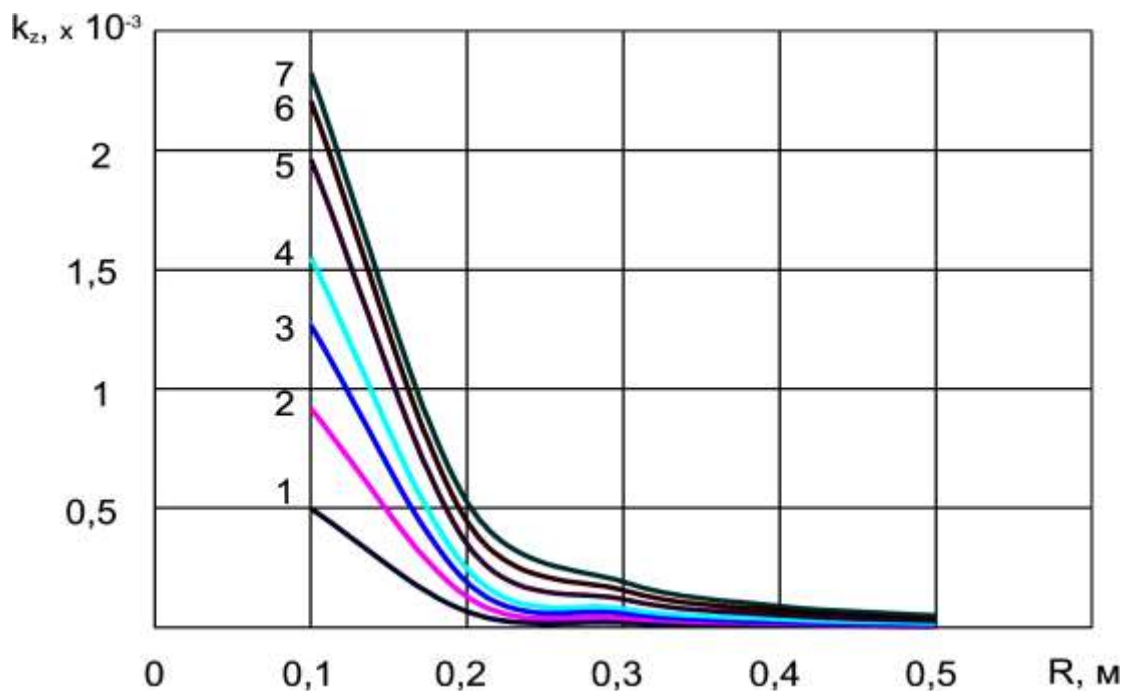


Рисунок 2.8 – Залежність коефіцієнта k_z від радіуса вихідного перерізу транспортувальної поверхні ($L=0,4\text{м}$; $\omega_1=0,046\text{рад/см}$): 1 – $x=5\text{мм}$; 2 – $x=10\text{мм}$; 3 – $x=15\text{мм}$; 4 – $x=20\text{мм}$; 5 – $x=30\text{мм}$; 6 – $x=40\text{мм}$; 7 – $x=50\text{мм}$.

Збільшення радіуса вихідного перерізу транспортувальної поверхні R призводить до зменшення зміни кривизни за висотою поперечних перерізів транспортувальної поверхні. Так, суттєве зменшення k_z відбувається для значень вихідного радіуса $R=0,18\ldots 0,4\text{м}$. Тому, під час проектування ґрунторозпушувальних елементів доцільно приймати радіус вихідного перерізу $R=0,18\text{м}$ і більше.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Задачі експериментальних досліджень

Задачами експериментальних досліджень було:

- дослідження фізичної суті процесу двоплощинного деформування скиби ґрунту під час його розпушення ґрунторозпушувальним елементом;
- отримання додаткових експериментальних даних для проведення аналітичних розрахунків;
- перевірка відповідності основних теоретичних викладок результатам експериментальних досліджень.

3.2. Програма експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження включали лабораторні, лабораторно-стендові дослідження, а також виробничо-польові випробування.

Лабораторні та лабораторно-стендові дослідження проводились з метою:

- встановлення впливу співвідношення товщини і ширини ґрунтової скиби на процес розпушення ґрунту ґрунторозпушувальним елементом;
- визначення міцності ґрунту на розтяг;
- дослідження впливу геометричних параметрів ґрунторозпушувального елемента на фізико-механічні властивості ґрунту та величину тягового опору.

3.3. Дослідження фізики процесу розпушення ґрунту ґрунторозпушувальним елементом

Експериментальні дослідження на ґрунтовому каналі проводилися із використанням відео зйомки, що дало змогу встановити характер та послідовність проходження процесу розпушення ґрунтової скиби ґрунторозпушувальним елементом. Зазначений процес був умовно поділений на три стадії. А саме:

- *первинне руйнування* ґрунтового масиву лемешем ґрунторозпушувального елемента;
- *наступне подрібнення* відокремленої скиби згинанням на транспортувальній поверхні (ТП);
- *заключне подрібнення* ґрунту при вільному його падінні після сходження з робочого органу та вкладанні в нарізану щілину.

Основні закономірності первинного руйнування ґрунту достатньо повно вивчені та описані в літературі [47-51]. Тому параметри лемеша для дослідного зразка розпушувача були прийняті на основі рекомендацій для робочих органів із пошаровою розробкою ґрунтового середовища [39].

На першому етапі експериментальних досліджень проводилось вивчення питання впливу вологості ґрунту на процес структуроутворення (ширина скиби $B_{розп}=0,4\text{м}$).

Дослідження показали, що при абсолютній вологості 25...30% різання ґрунту проходить за ознаками пружно-в'язко-пластичного середовища, тобто з утворенням зливної скиби. Зменшення вологості до 20...15% призводило до відокремлення шару ґрунту з формуванням елементної скиби у вигляді призматичних тіл, що є результатом розвитку у тілі скиби пружних деформацій (рис.3.1). Отже, характер процесу первинного руйнування корінним чином залежить від вологості ґрунту. Найкращою, з цієї позиції, є "оптимальна" вологість (16...18%), за якої ґрунт добре кришиться з утворенням агрономічно цінних агрегатів.



Рисунок 3.1 – Процес формування елементної скиби.

Попередньо відмічалось (п.1.3.), що розміри ґрунтових агрегатів, які утворюються в процесі різання, не повністю відповідають агротехнічним вимогам. В той же час, забезпечення рекомендованих розмірів агрегатів є основою якісного розпушення ґрунту. Тому виникає необхідність у продовженні силового впливу на відокремлений ґрунтовий елемент на другому етапі його розпушення (наступне подрібнення).

На другому етапі транспортування скиби ґрунту вздовж ТП поєднується з подальшим подрібненням ґрунту. Так, відокремлені ґрунтові агрегати, внаслідок підпору наступними, рухаються вздовж ТП ґрунторозпушувального елемента копіюють форму її поверхні і зазнають складного напруженого стану від дії зовнішніх силових факторів (згинальні напруження від дії власної ваги і ваги привантаження верхніми шарами ґрунту, що обвалився з верхніх ярусів, підпір наступними елементами сколювання на лемеші, тертя на ТП і т. ін.). Поступове збільшення останніх, як показують досліді, призводить до виникнення граничних напружень ґрунту, що супроводжується інтенсивним тріщиноутворенням та руйнуванням первинних елементів. Характер проходження вказаних ґрунтових процесів, а саме які напруження є вагомішими при розпушенні ґрунту, у значній мірі визначає співвідношення довжини та товщини елементів сколювання на лемеші та їх форма. З метою дослідження цих закономірностей розробка ґрунтового масиву проводилася із різною товщиною скиби.

Процес розпушення скиби ґрунту товщиною менше 0,05м супроводжувався інтенсивним тріщиноутворенням та руйнуванням уже на першій стадії розпушення. Тобто, утворення суцільних ґрунтових тіл при цьому не спостерігалось. Первинні елементи вказаної товщини, маючи малу міцність, вже на початку відокремлення від масиву під дією сил різання подрібнювались на дуже дрібні ґрунтові агрегати. При хаотичному русі останніх по ТП їх подальше руйнування відбувалось за рахунок перемішування на поверхні та сил взаємного тертя. Тому в даних умовах друга стадія подрібнення є не досить ефективною, бо не є керованою з точки зору отримання продукту розпушення з агрегатами необхідних розмірів. За таких умов ТП виконує переважно напрямну функцію.

Розпушення ґрунтової скиби товщиною 0,05...0,1м розпочиналось з формування суцільних елементів сколювання на лемеші. Переміщення їх вздовж ТП супроводжувалось початковим виважуванням на краях і, як наслідок, появою бокових сил стиску та згинального моменту. Як результат, спостерігалось початкове утворення бічних опірних площадок. Подальше переміщення елементів сколу призводило до збільшення силового впливу на нього зі сторони ТП. Коли величина згинального моменту досягала значень, що відповідали граничним умовам міцності, відбувалось руйнування первинного елемента навпіл (рис.3.2.). Далі процес руйнування повторювався, тобто збільшення величини згинання приводило до руйнування вже відокремлених від первинного елемента ґрунтових тіл.

Процес подрібнення скиби ґрунту товщиною 0,1м і більше спостерігався дещо іншим. Так, елементна скиба, потрапляючи на ТП, аналогічно попередньому випадку, зазнавала зовнішньої силової дії. Однак, результатом був не злом, а першочергове розшарування елементної скиби на первинному етапі, що принципово відрізняє даний процес від попереднього. Тобто, при зазначеному співвідношенні ширини і товщини скиби, остання попередньо руйнується за рахунок превалюючих у цьому випадку дотичних напружень у скибі (рис 3.3, 3.4). Після її руйнування навпіл змінюється згадані співвідношення і процес її подрібнення у подальшому буде аналогічним вище описаному процесу (рис. 3.5).

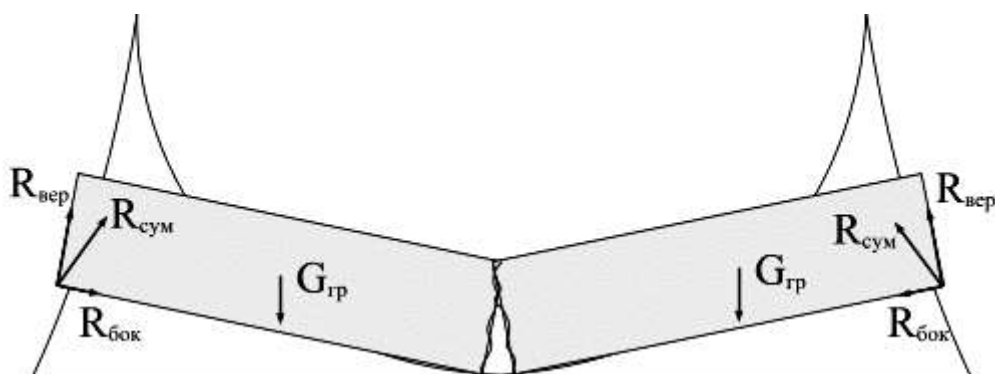


Рисунок 3.2 – Схема процесу подрібнення скиби ґрунту товщиною 0,05...0,1м.

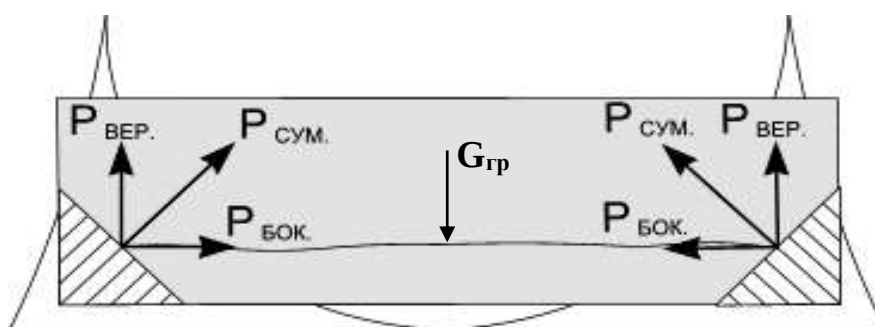


Рисунок 3.3 – Схема процесу подрібнення скиби ґрунту товщиною 0,1м і більше.

Під час подальшого руху частково зруйнованого ґрунтового елемента скиби вздовж ТП спостерігався подібний процес подрібнення кожної окремої частини в залежності від співвідношень їх ширини і товщини.

Аналізуючи наведені результати досліджень можна стверджувати, що для співвідношення товщини і ширини розпушувальної скиби 0,2 і більше в її тілі превалюють дотичні напруження, а руйнування розпочинається за рахунок розшарування. Для співвідношення меншого 0,2 в тілі скиби превалюють нормальні напруження і вона руйнується зломом (рис. 3.5). Керуючим параметром, який визначав величину і характер силового впливу на ґрунтову скибу та ступінь її подрібнення, є радіус поперечного перерізу ТП.



Рисунок 3.4 – Процес подрібнення ґрунту на транспортувальній поверхні.



Рисунок 3.5 – Процес руйнування ґрунту на транспортувальній поверхні.

Збільшення товщини зрізу до 0,2м явної зміни в процесі подрібнення ґрунту не давало. Основна відмінність полягала в кількості розшарувань, а процес подрібнення проходив за аналогією.

Заключна стадія розпушення - це вкладання розпушеного ґрунту в нарізану щілину. Піднявшись на деяку висоту відносно денної поверхні ґрунтові елементи проходили ТП, а потім під впливом гравітаційних сил обвалювалися донизу. Унаслідок падіння та контакту з нижніми горизонтами спостерігалось незначне подрібнення, ґрунтові агрегати подрібнювалися за рахунок удару. Додаткове кришіння на заключній стадії не знижувало якість розпушення.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Усі сільськогосподарські машини, трактори, а також транспортні засоби повинні бути справні і повністю укомплектовані набором інструментів, інвентарем для обслуговування згідно з заводськими інструкціями та аптечкою для першої медичної допомоги. Машини повинні мати захисні кожухи на всіх небезпечних механізмах, щоб уникнути травматизму серед обслуговуючого персоналу.

До роботи допускаються особи, що мають посвідчення на право керування машиною, добре знають конструкцію агрегату і регулювання, правила технічного обслуговування, правила виконання технологічного процесу і пройшли інструктаж по техніці безпеки при роботі на агрегаті.

- Під час роботи і технічного обслуговування присутність посторонніх осіб на агрегаті забороняється. Міняти робочі органи і підтягувати кріплення дозволяється тільки при зупиненому двигуні і при наявності відповідних підставок.
- До роботи на тракторах допускаються особи, які мають посвідчення на право їх керування. До отримання посвідчення студент може керувати трактором тільки в присутності майстра виробничого навчання або викладача.
- Приступаючи до роботи потрібно старанно заправити і защібнути одяг. Волосся необхідно сховати під шапочку або косинку.
- Перед початком роботи на будь-якій машині потрібно перевірити її технічний стан, комплектність і справність. Особливу увагу потрібно звернути на технічний стан механізмів керування, пуску і зупинки.
- Машиння, підтяжку болтових з'єднань і всі регулювальні операції на машинно-тракторних агрегатах необхідно проводити тільки при зупиненому двигуні.

- При заправці і перевірці рівня палива, а також при роботі на тракторах палити і користуватися відкритим полум'ям суворо заборонено.
- Бензобак пускового двигуна заправляти тільки при непрацюючому двигуні і охолодженій вихлопній трубі не допускаючи проливання палива.
- При попаданні бензина на руки, негайно вимити їх з милом.
- Старанно очищати і витирати всі частини двигуна від плям палива та оливи і негайно усувати виявлене підтікання.
- У випадку спалаху дизельного палива чи бензина, полум'я засипати землею, піском чи накрити брезентом. Категорично забороняється заливати полум'я водою.
- При доливанні води в гарячу систему охолодження, кришку заливної горловини відкривати тільки користуючись рукавицею чи ганчіркою. Лице тримати подалі від заливної горловини і не стояти проти вітру. Спочатку потрібно послабити кришку, потім випустити пару і тільки після цього знімати її з горловини.
- Перед пуском двигуна важіль коробки перемінних передач (КПП) і перемикач рядів повинен бути встановлений у нейтральне положення. Важіль вмикання валу відбору потужності (ВВП) – в положенні вимкнено.
- При запуску пускового двигуна категорично забороняється стояти проти маховика пускового двигуна.

Відповідає за техніку безпеки під час виконання технічного обслуговування машин на полі тракторист - машиніст агрегату. Він повинен бути проінструктований разом з машиністом чи комбайнером по всіх виконуваних ними роботах, а також одержати інструктаж з пожежної безпеки.

Технічне обслуговування машин у польових умовах проводять тільки в світлий час доби. Допускається проведення технічного обслуговування і в нічний час, але з умови достатнього освітлення. У нічний час технічне обслуговування машин виконується, як правило, не менш як двома працівниками.

Всі операції технічного обслуговування, крім деяких регулювань двигуна, виконують лише після повної зупинки двигуна. Під час накачування шин

періодично перевіряють тиск манометром. Перед тим як виконувати якусь роботу під машиною, її потрібно загальмувати, зупинити двигун, увімкнути одну з передач і підкласти під колеса колодки - упори. Виконуючи роботу під машиною, потрібно використовувати спеціальні підстилки, солом'яні мати.

При потребі обслуговування окремої частини машини в піднятому положенні, машину потрібно зафіксувати за допомогою надійних підставок і упорів, щоб не сталося довільного опускання або піднімання. Забороняється використовувати як підставки випадкові речі (ящики, цеглу, камені тощо), оскільки вони не відповідають нормам техніки безпеки.

Незалежно від призначення операції, машини і її конструкції треба дотримуватися таких загальних правил техніки безпеки:

- кваліфікація обслуговуючого персоналу повинна відповідати характеру роботи;
- перед початком роботи потрібно перевірити технічний стан машини;
- забороняється виконувати регульовані і змащувальні роботи під час руху машини;
- забороняється перебувати під час руху агрегату між трактором і сільськогосподарською машиною;
- стороннім особам, які не пов'язані з роботою агрегату, перебувати на агрегаті не можна;
- забороняється розпочинати роботу чи зупиняти агрегат без подачі відповідного сигналу;
- на комбайні потрібно слідкувати за справністю робочих площадок.

РОЗДІЛ 5

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОЯРУСНОГО РОЗПУШУВАЧА

5.1. Вихідні дані для розрахунку

Таблиця 5.1 - Характеристики базової та нової техніки

№ п/п	Показники та одиниці вимірювання	Базова техніка	Нова техніка
1	Вага робочого органа, кг	950	1850
2	Потужність двигунів, кВт	70	70
3	Годинна технічна продуктивність, га/год	2	0,4
4	Кількість обслуговуючого персоналу	1	1

5.2. Розрахунок енергетичних витрат

Основним завданням енергетичного аналізу аграрного виробництва є вивчення, кількісна оцінка, оптимізація потоків енергетичних витрат та управління ними в агросистемах. Енергетичні втрати на розпушення включають витрати на амортизацію трактора та розпушувача, витрати паливно-мастильних матеріалів, витрати праці людини.

$$E_v = E_T + E_p + E_{\Pi} + E_{\text{Л}}, \quad (5.1)$$

де E_v - енергетичні витрати на розпушення, Дж;

E_T - енергетичні витрати тракторів, Дж;

E_p - енергетичні витрати на розпушувач, Дж;

E_{Π} - енергетичні витрати на паливо, Дж;

$E_{\text{Л}}$ - енергетичні витрати праці людини, Дж.

Як бачимо з таблиці 5.3, основна частка енерговитрат припадає на сільськогосподарську техніку та ґрунтообробне знаряддя, незначний відсоток становлять енерговитрати людської праці.

Таблиця 5.3 – Енергетична оцінка традиційного та багатоярусного розпушення

№ п/п	Показник	Традиційне розпушення	Багатоярусне розпушення
1	Трактор	ДТ-75	ДТ-75
2	Розпушувач	Стояковий	Багатоярусний
3	Виробіток за одну годину, га	2	1,08
4	Змінна норма виробітку, га	16	2,8
5	Обслуговуючий персонал	1	1
6	Витрати палива на 1га, кг	4,25	7,9
7	Витрати праці на 1га, люд-год	0,81	1,51
	Енергетичні витрати на одиницю площі (1га), МДж.		
8	Тракторів	20	37
9	Розпушувачів	7,6	21,9
10	Палива	2,6	4,8
11	Праці людини	0,05	0,09
	Разом	30,25	63,79

Вирощування сільськогосподарської продукції забезпечує одержання первинної сільськогосподарської продукції, тобто енергії у вигляді органічної речовини.

Енергетична оцінка первинної сільськогосподарської продукції проводиться на основі обсягу виробництва господарсько-корисної продукції і її калорійності, тобто визначається енергетичний потенціал, що одержують при вирощуванні сільськогосподарських культур [151]:

$$E_n = \sum_{i=1}^n O_{acp_i} K_i, \quad (5.2)$$

де E_n - енергетичний потенціал (калорійність) одержаної продукції, Дж;

$O_{\text{аср}}$ - обсяг і-ої абсолютно-сухої речовини, кг/га;

K_i - калорійність і-ї абсолютно-сухої речовини, Дж/кг.

Показник енергетичної ефективності аграрного природокористування сільськогосподарськими землями визначається як відношення енергетичного потенціалу до енергетичних витрат, а саме:

$$E_e = \frac{E_n}{E_v}, \quad (5.3)$$

де E_e - показник енергетичної ефективності аграрного природокористування на осушених землях;

E_n - енергетичний потенціал первинної продукції, Дж;

E_v - енергетичні витрати на розпушення, Дж;.

Якщо показник енергетичної ефективності великий, то це свідчить, що технологія наближується до ресурсо – та енергозберігаючих. Показник залежить від ґрунтово-кліматичних умов, ступеня техногенної навантаженості структури посівних площ і наявності науково обґрунтованих сівозмін. Розрахунки коефіцієнта енергетичної ефективності наведені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Коефіцієнт енергетичної ефективності розпушення

Варіанти	Витрачено енергії МДж	Одержано енергії МДж	Коефіцієнт енергетичної ефективності
Традиційне, ділянка “Уїздці”	30,25	37,8	1,24
Багатоярусне, ділянка “Уїздці”	63,79	108,6	1,7

Енергетичний аналіз вказує на те, що багатоярусне розпушення, в порівнянні з традиційним, має більшу енергоємність, але прибавка врожаю тільки за перший рік майже повністю покриває затрати на його реалізацію.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У роботі наведено теоретичне узагальнення та нове вирішення науково-прикладної задачі, що виявляється у поліпшенні якості глибокого розпушення ґрунту завдяки використанню процесу двоплощинного деформування скиби ґрунторозпушувальним елементом та обґрунтування параметрів багатоярусного агромеліоративного розпушувача і розкриття його впливу на ґрунтове середовище.

2. Розроблені теоретичні засади напружено-деформованого стану ґрунту дали змогу отримати аналітичну модель деформування скиби. Аналізом зазначеної моделі встановлено величину радіуса поперечного перерізу транспортувальної поверхні, за якого розпочинається процес руйнування ґрунтової скиби ($R_x = 0,4 \dots 0,3\text{м}$ для суглинку: $C = 0,04\text{МПа}$, $\rho_{\text{гр}} = 1700\text{кг/м}^3$, $V_{\text{розп}}/h = 2,5$).

3. Дослідження кривизни поперечних перерізів транспортувальної поверхні, рівняння якої отримано з умови рівномірного деформування ґрунтової скиби, дозволило встановити раціональну довжину ґрунторозпушувального елемента $L = 0,4 \dots 0,5\text{м}$, яка забезпечує максимальне наближення кривих поперечних перерізів до дуг кіл.

4. Експериментальні дослідження величини структурних агрегатів розпушеного ґрунту показали, що за оптимальної вологості ґрунту (16...18%) і раціональної товщини скиби ($h = 0,14 \dots 0,16\text{м}$) з метою забезпечення необхідної якості розпушення необхідно використовувати ґрунторозпушувальні елементи з радіусом вихідного перерізу $R = 0,15 \dots 0,20\text{м}$.

5. Енергетичний аналіз свідчить про те, що значення коефіцієнта енергетичної ефективності на варіанті з багатоярусним розпушенням є рівним 1,7, а на ділянці з традиційним – 1,24.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Баладінський В.Л., Кравець С.В., Романовський О.Л. Обґрунтування форми

- відвалу ґрунтозахисних багатоярусних робочих органів. //Гірничі будівельні, дорожні і меліоративні машини. Респ.міжвід.наук.-техн.зб. - К.: Техніка, 1995. - Вип 49. С.37-39.
2. Ветохин В.И. Малоэнергоёмкие рыхлители почвы: форма продольного профиля рабочей поверхности. //Тракторы и сельскохозяйственные машины, - 1993, №6. С.21-26.
 3. Ветохин В.И. Метод проектирования безотвальных рабочих органов. //Тракторы и сельхозмашины, - 1993, №9. С.14-17.
 4. Власенко В.М. Экологические требования к почвообрабатывающим орудиям и посевным машинам. //Тракторы и сельскохозяйственные машины, - 1993, №9. С.14-16.
 5. Вольтерс А.Ю. Закономерности стружкообразования при щелевом и последовательном резании. - В кн.: Горн., строит., дор. и мел. Машины: Респ.межвед.науч.-техн.сб. - К.: КТ+ИСИ, 1991. - Вып.45. С.39-45.
 6. Горбачев Ю.Г., Шапирштейн А.Б. Анализ формирования нагрузок при разрушении грунта резцом. //Строительные и дорожные машины. - М.: Машиностроение, 1991. - №10. С.18-19.
 7. Грачев Л.А. Влияние постановки ножей и стойки плоскорежущих лап на сопротивление почвы при культивации //Вестник механизации и электрификации. 1990. - №5.
 8. Ґрунтозахисні та енергозберігаючі машини для прокладки підземних комунікацій /С.В.Кравець – Рівне: Видавництво РДТУ, 1999. – 277с.
 9. Защита орошаемых земель от эрозии, подтопления и засоления / Т.Н. Хрустова, И.К. Срибный, И.И. Андрусенко и др. – К.: Урожай, 1991. –208с.
 10. Карнаухов М.М. Вдосконалення технологічного процесу руйнування ґрунту безвідвальним багатоярусним робочим органом: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Луцьк, 1999. –17с.
 11. Кожушко Л.Ф., Кравец С.В., Попроцкий В.Н. и др. Глубокое объемное рыхление тяжелых слабоводопроницаемых почв. - Ровно: ЦНТИ, 1990. - 16с.
 12. Кравец С.В., Ткачук В.Ф., Романовский А.Л., Нечидюк А.А. Принципы

- конструирования многоярусных рабочих органов для глубокой разработки
талых грунтов. //Строительные и дорожные машины. - М.: Машиностроение,
1994. - №5 - С.15-18.
13. Кравець С.В. Розробка і створення багатоярусних ґрунтозахисних
безтраншейних укладачів різного призначення: Автореф. дис... д-ра. техн.
наук. – Київ, 1996. –42с.
 14. Кравець С.В., Карнаухов М.М. Безвідвальний багатоярусний робочий орган
для укладання трубопроводів. - У кн.: Горні, буд., дор. і меліорат.машини:
Респ.міжвід.наук.-техн.зб. - К.: КДТУБА, 1993. - Вип.48. С.104-108.
 15. Кравець С.В., Ткачук В.Ф., Рижий О.П. Вплив багатоярусного розпушення на
водно-фізичні властивості ґрунтів. Збірник статей за матеріалами III наук.-
техн. конференції. –ч.4; “Механізація і автоматизація”. –Рівне: -УДАВГ,
1997. С.16-17.
 16. Кравчук В.І., Корабельський В.І., Ветохін В.І. Розробка ґрунтообробних
знарядь та пристроїв по геометричному моделюванню умов збереження
екології земель //Міжвідомча науково-технічна збірка “Прикл. геом. та інж.
граф”, вип.64, - Київ, - 1998. –С.63-65.
 17. Мелиорация переуплотненных минеральных земель / Ш.И. Брусиловский,
П.П. Евчик, И. Яготский и др. – Минск: Ураджай, 1990. –224с.
 18. Метод прямых и его использование при определении напряженно-
деформированного состояния пластин и оболочек /Л.Т.Шкелев,
Ю.А.Морсков, Т.А.Романова, А.Н.Станкевич. НАН Украины, Институт
механики им. С.П.Тимошенко. Технический центр – К., 2002. –177с.
 19. Муеллер Л., Миттелстенд Р. О глубине рыхления тяжелых почв. -
Почвоведение, 1990. -№9. С.140-144.
 - 20.Нагорний М.Н. Технології і технічні засоби ґрунтозахисного контурно-
меліоративного землеробства. – К.: Урожай, 1994. –248с.
 - 21.Недвиг М.В., Хомчак М.Ю., Осадчий О.С., Бойко Л.Д. Лабораторний і
польовий практикум з ґрунтознавства. –К.: Агропромвидав України, 1999. –
240с.

22. Нечидюк А.А. Розробка і дослідження двох`ярусного безтраншейного укладача підземних комунікацій: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Дніпропетровськ, 2002. – 20с.
23. Панченко А.Н. Аналитические методы расчета тяговых сопротивлений почвообрабатывающих и землеройных машин и оценка их эффективности для энергосберегающих технологий: Учебное пособие /Днепропетр. гос.агр.ун-т. – Днепропетровск, 1995. - 96с.
24. Панченко А.Н. Теория измельчения почв почвообрабатывающими орудиями /Днепропетр. гос.агр.ун-т. – Днепропетровск, 1999. - 140с.
25. Пат. 46026 України, МКВ E02F5/32, E02F5/30. Робочий орган розпушувача /О.П.Рижий, В.Ф.Ткачук, О.А.Сиротинський, О.Л.Романовський, І.В.Ткачук (Україна). -№97115683, 15.05.2002; Заявл. 27.11.97; Опубл. 15.05.2002, Бюл. №5. –2с.
26. Перспективные технологии строительства и эксплуатации мелиоративных систем /Е.Д.Томин, Ю.А.Соколов, Л.Н.Бадаев и др. Под ред.Е.Д.Томина - М.: Агропромиздат, 1990. - 229с.
- 27.Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів. К.:” Вища школа”, 1993.
28. Рижий О.П. Дослідження тягового опору при розробці ґрунту багатоярусним робочим органом. Вісник Рівненського державного технічного університету. Збірник наукових праць, в.2, ч.3, -Рівне: - РДТУ, 1999. –С.169-172.
29. Рижий О.П. Покращення властивостей важких ґрунтів багатоярусним розпушувачем жолобоподібної форми. Вісник Української державної академії водного господарства. Збірник наукових праць, в.1, ч.1, -Рівне: - УДАВГ, 1998. –С.156-158.
30. Рижий О.П. Результати досліджень показників меліоративного розпушувача жолобоподібної форми //Вісник Тернопільського державного технічного університету ім.І.Пулня. – Тернопіль, 1999. –Т.4. – Число 2. –С.95-98.
31. Розробити і впровадити енергозберігаючі робочі органи машин для глибокого різання важких ґрунтів. /Заклучний звіт// Укр.ін-т інж.водн.госп. -

- №ДР ИА 01012656Р: № 5-01. - Рівне, 1993, - 82с.
32. Романовський О.Л. Дослідження технологічного процесу роботи та обґрунтування параметрів багатоярусного робочого органу безтраншейного дренаукладача: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Луцьк, 1996. –16с.
 33. Романовський О.Л., Ткачук В.Ф., Рижий О.П. Дослідження ґрунторозробних органів розпушувача талих ґрунтів //Техніка будівництва. –К., 1998, №4. – С.83-86.
 34. Рудаковский В.Г., Титов В.Н. О ходе работ по созданию рабочего органа объемного рыхлителя-дреноукладчика для бестраншейного способа строительства дренажа. - В кн.: Мелиорация переувлажненных земель. Ее социально-экономические и экологические последствия - Минск: 28-29 июня /БелНИИМиВХ, 1990. - С.96-102.
 35. Смирнов В.Н. Повышение эффективности рабочих органов землеройных машин. - К.: Полиэкс, 1993. - 144с.
 36. Стахів О.А. Енергетична оцінка ефективності аграрного природокористування на торфових ґрунтах Західного Полісся України . Автореф. дис.... канд. економічних наук./ Київ., 2001.-20с.
 37. Ткачук В.Ф., Васылив В.Б., Рыжий А.П. Новый многоярусный агромелиоративный рыхлитель. - В кн.: Проблемы мелиорации и водного хозяйства на современном этапе. –ч.4. Беларусь, г.Горки, 1999. С.138-141.
 - 38.Ткачук В.Ф., Рижий О.П. Дослідження міцності та деформаційних властивостей талих ґрунтів при розтягуванні. Вісник Рівненського державного технічного університету. Збірник наукових праць, в.3 (16), - Рівне: -РДТУ, 2002. –С.211-216.
 - 39.Ткачук В.Ф., Рижий О.П. Математична модель кришильного ковша багатоярусного агромеліоративного розпушувача // Сільськогосподарські машини, Зб.наук.ст., вип.8. –Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛДТУ, 2001. –С.279-284.
 - 40.Хайлис Г.А. Механика растительных материалов. – К.: УААН, 2002. –374с.
 - 41.Хайлис Г.А. Механика растительных материалов. –Киев, УААН, 1994. –334с.
 - 42.Хайлис Г.А. Основы теории и расчета сельскохозяйственных машин. - Киев,

изд. УСХА, 1992. -240с.

- 43.Хайлис Г.А. Расчет рабочих органов почвообрабатывающих машин. – К.: УМК ВО, 1990. –146с.
- 44.Хайліс Г.А., Коновалюк Д.М. Основи проектування і дослідження сільськогосподарських машин: Навч. Посібник. – К.: НМК ВО, 1992. –320с.
45. Хмара Л.А., Колесник Н.П., Станевский В.П. Модернизация и повышение производительности строительных машин. - К.: Будівельник, 1992. - 152с.
46. Шелудченко Б.А. Агромеханіка ґрунтів. – Житомир: Полісся, 1992. – 249с.