

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ  
ІМЕНІ ПРОФЕСОРА ОЛЕКСАНДРА СЕМКОВИЧА

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: «ДОСЛІДЖЕННЯ УЩІЛЬНЮЮЧОЇ ДІЇ РУШІВ МАШИННО -  
ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ ПІД ЧАС ВЗАЄМОДІЇ З ГРУНТОВИМ  
СЕРЕДОВИЩЕМ»

Виконав: студент VI курсу групи Аін-61

Спеціальності 208 «Агроінженерія»  
(шифр і назва)

Назар ЖЕЛЕЗНЯК  
(Прізвище та ініціали)

Керівник: д.ф., в.о.доцента Оксана БЕРЕЗОВЕЦЬКА  
(Прізвище та ініціали)

ДУБЛЯНИ 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ  
ІМЕНІ ПРОФЕСОРА ОЛЕКСАНДРА СЕМКОВИЧА

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

к.т.н., доцент Шарибура А.О.  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу студенту  
Железняку Назарію Андрійовичу

1. Тема роботи: «Дослідження ущільнюючої дії рушіїв машинно - тракторних агрегатів під час взаємодії з ґрунтовим середовищем»

Керівник роботи: Березовецька Оксана Георгіївна, д. ф., в.о. доцента  
Затверджена наказом по університету від 12.09.2024 року 616/к-с

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 10.01.2025 року

3. Вихідні дані до работ: довідкова література, каталоги, методики визначення твердості ґрунту, технічні характеристики МТА та їх рушіїв, інструкції з охорони праці.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

4.1. Стан питання і завдання досліджень

4.2. Теоретичні передумови ущільнення ґрунту ходовими системами МТА

4.3. Програма та методика експериментальних досліджень

4.4. Результати досліджень та методи зменшення ущільнюючого впливу ходових систем МТА на ґрунт

4.5. Охорона праці та захист навколишнього середовища

Висновки і пропозиції

Список використаних джерел

5. Перелік графічного ілюстраційного матеріалу:

Графічна частина до кваліфікаційної роботи оформляється у вигляді презентації.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3, 4	<i>Березовецька О.Г., д.ф., в.о. доц. кафедри агроінженерії та технічного сервісу ім. проф. О. Семковича</i>			
5	<i>Городецький І.М., к.т.н., доцент кафедри фізики, інженерної механіки та безпеки виробництва</i>			

7. Дата видачі завдання «13» вересня 2024 року

### ***КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН***

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	Стан питання та задачі досліджень	<i>13.09.24-04.10.24</i>	
2	Теоретичні передумови ущільнення ґрунту ходовими системами МТА	<i>07.10.24-25.10.24</i>	
3	Програма та методика експериментальних досліджень	<i>28.10.24-15.11.24</i>	
4	Результати досліджень та методи зменшення ущільнюючого впливу ходових систем МТА на ґрунт	<i>18.11.24-06.12.24</i>	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	<i>09.12.24-20.12.24</i>	
6	Оформлення пояснювальної записки	<i>23.12.24-27.12.24</i>	
7	Оформлення графічної частини	<i>30.12.24-10.01.25</i>	

Студент \_\_\_\_\_ Назар ЖЕЛЕЗНЯК  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Оксана БЕРЕЗОВЕЦЬКА  
(підпис)

УДК 631.372:631.51

Дослідження ущільнюючої дії рушіїв машинно - тракторних агрегатів під час взаємодії з ґрунтовим середовищем. Железняк Назарій Андрійович. Кафедра агроінженерії та технічного сервісу імені професора Олександра Семковича. Дубляни, Львівський НУП. 2024.

65 с. текст. част., 29 рис., 2 табл., 19 літературних джерел.

У кваліфікаційній магістерській роботі досліджено конструкцію, типи та методи проектування ходових систем машинно-тракторних агрегатів (МТА). Особливу увагу приділено аналізу причин ущільнення ґрунту, впливу експлуатаційних факторів та способам зменшення їхнього негативного впливу. Проведено теоретичні та експериментальні дослідження взаємодії ходових систем із ґрунтом, розроблено математичні моделі оцінки ущільнення та визначено оптимальні параметри рушіїв.

Експериментально встановлено, що збільшення ширини гусеничного трака до 450 мм знижує ущільнення ґрунту на 20% та обмежує його глибину до 30 см. Оптимальний питомий тиск на ґрунт для гусеничних рушіїв визначено на рівні 0,1 МПа, що забезпечує збереження фізико-механічних властивостей орного шару. Розраховано, що впровадження запропонованих конструктивних змін зменшує енергоспоживання агрегатів на 15% та покращує продуктивність роботи.

Запропоновано рекомендації щодо оптимізації параметрів МТА, включаючи використання гусеничних рушіїв, збільшення їх ширини та зниження навантаження на ґрунт. У роботі також розроблено комплекс заходів із охорони праці та захисту навколишнього середовища, спрямованих на підвищення екологічної безпеки та сталого розвитку аграрного виробництва.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ З НЕОБХІДНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТУ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ЙОГО ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ .....	10
1.1 Основні положення проблеми щодо погіршення фізико-механічних властивостей ґрунтів ущільненням ходовими системами МТА .....	10
1.2 Огляд теоретичних досліджень процесу ущільнення ґрунтового середовища .	15
1.3 Аналіз розрахункових методів визначення впливу колісних рушіїв на ґрунт....	20
Висновок за розділом 1 .....	21
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТУ ХОДОВИМИ СИСТЕМАМИ МАШИНО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ.....	22
2.1 Характеристики ущільнення ґрунту під дією ходової системи МТА .....	22
2.1.1 Епюри розповсюдження напружень в ґрунті під дією навантажень.....	24
2.2. Граничний рівень ущільненого ґрунту за показником врожайності сільськогосподарських культур.....	27
2.3. Взаємозв'язок впливу на ґрунт різних типів ходових систем.....	29
Висновок за розділом 2 .....	33
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ВПЛИВУ ХОДОВИХ СИСТЕМ МТА НА ПІДОРНІ ШАРИ ҐРУНТУ .....	34
3.1 Програма досліджень.....	34
3.2 Методика експериментальних досліджень .....	34
3.2.1 Методика визначення напружень від рушіїв МТА в підорних шарах ґрунтового середовища .....	34
Висновки за розділом 3 .....	38

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ УЩІЛЬНЮЮЧОГО ВПЛИВУ ХОДОВИХ СИСТЕМ МТА НА ҐРУНТ.....	39
4.1 Результати дослідження залежності питомого тиску на ґрунт від робочої швидкості МТА.....	40
4.2 Експериментальні дослідження твердості ґрунту .....	42
4.3 Способи зменшення ущільнення ґрунту МТА. ....	47
4.4 Дослідження спрощених робочих органів для підорного шару ґрунту.....	51
Висновок за розділом 4.....	55
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА .....	56
5.1 Загальні вимоги з охорони праці .....	56
5.2 Зменшення ущільнення ґрунту .....	57
5.3 Екологічна безпека .....	58
5.4 Охорона навколишнього середовища.....	59
5.5 Пожежна безпека .....	59
5.6 Моніторинг екологічного впливу.....	60
Висновки за розділом 5.....	61
ВИСНОВОКИ І ПРОПОЗИЦІЇ .....	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	64

## ВСТУП

Сучасне сільське господарство характеризується інтенсивним застосуванням машинно-тракторних агрегатів (МТА) у виробничих процесах, що забезпечує високу продуктивність і ефективність технологій обробки ґрунту та вирощування сільськогосподарських культур. Однак сільськогосподарська механізація супроводжується підвищеним впливом на ґрунт, основним проявом якого є ущільнення. Відомо, що ущільнення ґрунту негативно впливає на його водно-повітряний режим, знижує біологічну активність, погіршує структуру орного шару, а також призводить до зменшення врожайності сільськогосподарських культур. І саме, дія ходових систем МТА є основним джерелом механічного ущільнення ґрунту. Результати досліджень свідчать, що в процесі виконання технологічних операцій площа поля, піддана багаторазовій дії рушіїв, значно перевищує площу самого поля. Десять – дванадцять відсотків площі поля піддаються дії від 6 до 20 разів; шістьдесят – вісімдесят відсотків від 1 до 6 разів; десять – п'ятнадцять відсотків площі не піддаються дії, тобто залишаються недоторканими. Ущільнення може досягати глибини 0,3–0,6 м, що найбільше вражає верхній родючий шар ґрунту. Такий вплив знижує не лише продуктивність ґрунту, але й ефективність роботи сільськогосподарської техніки, зокрема через збільшення енерговитрат.

Одним із чинників, які обмежують ріст і розвиток рослин, а відповідно і їх продуктивність, є надмірне ущільнення ґрунту. Основними чинниками, які призводять до переущільнення, є природні – дощ та сили гравітації, антропогенні, механічна дія ходових систем тракторів, комбайнів, ґрунтообробних агрегатів. Маса машинно-тракторних агрегатів (МТА) за останні 40–50 років зростає в 2–5 разів. У зв'язку з цим тиск ходових систем тягово-транспортних засобів на ґрунт зріс до 150–220 кПа, тракторних причепів та автотранспорту для відвезення продукції рослинництва та внесення добрив – до 180–520 кПа. Це в 3–7 раз

перевищує допустимий за агротехнічними вимогами рівень питомого навантаження на ґрунт.

Зростання маси й габаритних розмірів сучасної техніки, необхідність виконання складних операцій із високими тягово-швидкісними показниками, а також часте застосування інтенсивних механізованих технологій обробітку поля посилюють проблему ущільнення ґрунту. З іншого боку, ефективність роботи ходових систем МТА значною мірою залежить від їхньої взаємодії з ґрунтовим середовищем, яка залишається недостатньо дослідженою. Зокрема, потребують розробки науково обґрунтовані рекомендації щодо зниження ущільнюючої дії ходових систем та обґрунтування їхніх конструктивних параметрів.

**Актуальність теми роботи** зумовлена необхідністю пошуку шляхів оптимізації конструкцій ходових систем і технологій їх використання для зменшення негативного впливу на ґрунтове середовище. Це забезпечить збереження родючості ґрунтів, підвищення енергоефективності та зменшення експлуатаційних витрат при використанні МТА.

**Об'єкт дослідження** - є технологічний процес взаємодії ходових систем МТА із ґрунтовим середовищем, що визначає вплив на фізико-механічні властивості орного шару під час виконання польових робіт.

**Предметом дослідження** виступає взаємозв'язок параметрів і режимів роботи ходових систем МТА з рівнем ущільнюючої дії на ґрунт, а також залежність змін характеристик ґрунту від конструктивних і експлуатаційних параметрів рушіїв.

**Метою дослідження** є вивчення впливу конструктивних і експлуатаційних параметрів ходових систем МТА на взаємодію з ґрунтовим середовищем, а також розробка заходів для зниження ущільнюючої дії.

Поставлені завдання передбачають проведення теоретичних і експериментальних досліджень взаємодії ходових систем з ґрунтом, аналіз їхньої впливу на структурно-механічні властивості орного шару, а також розробку



рекомендацій для оптимізації конструкції та технологій експлуатації ходових систем МТА. В теоретичних дослідженнях використано метод математичного моделювання, методи теоретичної механіки, кінематика твердого тіла, методика механіки ґрунтових середовищ, метод інтерполяції для формування часткових характеристик, методи планування експерименту, при цьому широко використовувались прикладні комп'ютерні програми такі як *Excel*, *SolidWorks*.

Отримані результати матимуть рекомендаційний характер та сприятимуть підвищенню ефективності використання машинно-тракторних агрегатів, збереженню родючості ґрунтів та забезпеченню сталого розвитку сільського господарства.

## **РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ З НЕОБХІДНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТУ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ЙОГО ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ**

### **1.1 Основні положення проблеми щодо погіршення фізико-механічних властивостей ґрунтів ущільненням ходовими системами МТА**

Сучасні засоби механізації дозволяють зменшити інтенсивність людської праці, замінити важку ручну роботу та покращити умови праці робітників. Без машинних систем агропромислове виробництво немислиме. Проте, поряд з цими сучасними машинними системами виникає і низка негативних явищ. Перш за все вони є джерелами погіршення навколишнього середовища (повітря, води, ґрунту і т.д.). Особливо небезпечною є руйнування рушіями МТА ґрунту в шарі 1,0 м, яка покриває всього 3 % поверхні нашої планети і від якої залежить життя людства. Технічний процес збільшив продуктивність праці людини в тисячі разів, але паралельно з цим він збільшив в десятки разів і інтенсивність взаємодії робочих органів та рушіїв МТА з ґрунтом.

В процесі вирощування і збирання сільськогосподарських культур різні МТА проходять по полю 5–15 раз [1]. Глибина ущільнення ґрунту досягає 0,6 м, а в деяких випадках і більше 1 м [7]. Сумарна площа слідів рушіїв цих МТА в 2 рази більша від площі поля, яка обробляється, при цьому 10-12 % площі поля піддається дії рушіїв МТА від 6 до 20 раз, 65-80 % - від 1 до 6 раз і тільки 10-15 % не зазнають дії рушіїв в період вегетації сільськогосподарських культур [3].

Рівень ущільнення ґрунту зумовлюється багатьма факторами, серед яких важливу роль відіграють засоби механізації та технологічні процеси, що залежать від ступеня розвитку системи землеробства та впровадження технічних інновацій. Основні чинники, що впливають на процес ущільнення ґрунту, представлені на рис. 1.1. [4].

### Рис. 1.1 - Структура ущільнюючих чинників

Дощові опади сприяють ущільненню ґрунту внаслідок ударів крапель, утворення запливання, а також через додаткову масу води. Інтенсивність ущільнення зростає пропорційно до кількості опадів. Гравітація, як чинник, впливає на ущільнення ґрунту залежно від його вологості, складу, температурних коливань тощо.

Системи механізації, відносно сільськогосподарського використання, мають різну конструктивну особливість, що обумовлює відмінності в ступені ущільнення ґрунту. Наприклад, гусеничні трактори створюють менший тиск на ґрунтовий шар, порівняно з колісними. Система механізації трактора з меншим кроком рушію і меншою відстанню між опорними котками чинять менший ущільнюючий вплив.

Колісні ходові системи також характеризуються різними конструктивними параметрами (спарені колеса, розширений профіль шин, високий чи низький тиск шин), що впливають на питомий тиск на ґрунт, ступінь деформації ґрунту під час буксування, і, як наслідок, на рівень ущільнення. Склад МТА визначає ущільнення через масу, тип рушіїв, кількість опорних систем, ширину захвату агрегату та швидкість його руху. Тип технологічної операції також впливає на ущільнення через структуру агрегату, ширина захвату, період виконання операції, стан ґрунту та повторність проходів. Кількість проходів трактора чи сільськогосподарських машин прямо, що пропорційно впливає на ступінь ущільнення.

Конструктивні особливості робочих органів, які залежать від виду технологічної операції, також мають різний вплив на ґрунт.

Наслідки ущільнення ґрунту (рис. 1.2) мають істотний вплив на зниження його родючості та врожайності сільськогосподарських культур. Найбільший вплив мають параметри ходової системи МТА. Зокрема, агрегати з великою масою значно погіршують фізико-механічні властивості ґрунту, навіть за низького питомого тиску.

За останні роки маса тракторів, а відповідно і МТА на їх основі, істотно зросла. Якщо в 1995 р. вага трактора з двохколійною приводною схемою мала середню масу 4...6 т, то сучасні трактори з чотирьох приводною схемою мають масу до 20 т і більше.

Ця ситуація породжує інженерне завдання, пов'язане з компромісом між продуктивністю МТА і їх негативним впливом на ґрунт. Машинно-тракторні агрегати, здатні забезпечити високу продуктивність, зазвичай мають значну вагу, що підвищує рівень ущільнення ґрунту під час виконання кожної технологічної операції.

Фізико-механічні процеси, що відбуваються під час обробки ґрунту, призводять до зміни структури шару ґрунту і, як наслідок, до зміни течії масо- і

енергообміну процесів (водного, повітряного, теплового, живлення та інших), і як результат - зміна врожаю сільгоспкультур.



Рис. 1.2 - Схематична структура впливу наслідків ущільнення ґрунту

Серед актуальних соціально-економічних проблем можна виділити: погіршення стану екології, через концентрацію виробництв, відходи; шкідливі речовини в атмосфері внаслідок згорання палива, газу, двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), які становлять до 60% загальних шкідливих викидів. При цьому близько 50% переробленої нафти використовується дизельним двигуном.

Спроби замінюючи застосування різних альтернативних видів палива (газоподібного, зрідженого вугілля, водневого, метанолового, рослинних олій, біогазу тощо) розвиваються, та на сьогодні технології виробництва біодизеля ще не здатні забезпечити доступним паливом трактори та іншу техніку, замінюючи нафтові ресурси. Покращення екологічної ситуації вимагає активного пошуку альтернативних видів палива для ДВЗ та максимального впровадження у сільськогосподарському виробництві, екологічно чистих джерел енергії (наприклад електроенергія).

По мірі розвитку технічного прогресу і застосування машин у сільськогосподарському виробництві інтенсивність дії різних робочих органів на

грунтове середовище зростає. У процесі вирощування культур грунтове середовище ущільнювалось машинами на глибину до 1 м. У певний період негативна дія рушіїв МТА компенсувалась розпушуванням ґрунту (основний обробіток) на глибину 27–30 см. Однак, коли вага сучасних машинних систем різко зростає, то не дивлячись на передбачені в їх конструкції заходи із зменшення ущільнюючого тиску рушіїв на грунтове середовище, переущільнення ґрунту (тобто надмірна його деформація, не відновлювальна деформація) досягала глибини до 0,6 м.

Із вище приведеного випливає висновок, що в процесі виконання технологічних операцій небажаним, але допустимим, є переущільнення ґрунту в шарі 0–30 см, тобто, в зоні дії робочих органів традиційних ґрунтообробних знарядь. Переущільнення ґрунту в шарах нижче 30 см є недопустимим, так як призводить до істотного погіршення умов росту і розвитку рослин, а відновити оптимальну щільність в цих шарах дуже проблематично. Проблема ущільнення ґрунтового середовища рушіями МТА ускладнюється і тим, що саме грунтове середовище постійно змінює свої фізико-механічні властивості в функції часу (рис. 1.3) [4].

Рис. 1.3 - Щільність (Щ), вологість (W) та температура (Т) на полях під озимою пшеницею по непарових попередниках у Миколаївському р-ні Львівської обл.: ○ – вологість; Δ - щільність; + - температура

Фізико-механічні властивості ґрунту - це сукупність властивостей ґрунту, що визначають їх ставлення до зовнішніх і внутрішніх механічних впливів: твердість, пластичність, в'язкість, липкість, плинність, усадка, опір розриву або стиску, кручення, тертя ґрунту об ґрунт, тертя ґрунту об метал і інші матеріали, питомий опір ґрунту при обробці, опір ґрунту руху машин і знарядь [2, 8, 11, 13].

Тобто, один і той же ґрунт на одному і тому ж місці змінює свої властивості в граничних межах: у перезволожений період року несуча здатність ґрунту знижується до фактичного нуля (для техніки), а в засушливий період її несуча здатність істотно перевищує ті напруження, які виникають від рушіїв МТА. Слід відмітити, що закономірності зміни фізико-механічних властивостей ґрунту досліджені не достатньо.

Переважає більшість дослідників займались ущільненням ґрунтового середовища в зоні контакту ходових систем з опорною поверхнею та в орному шарі. Впливу ходових систем на більш глибокі шари ґрунту (30-70 см) приділено значно менше уваги, тому необхідно провести більш ретельні теоретичні та експериментальні дослідження в цьому напрямку

## **1.2 Огляд теоретичних досліджень процесу ущільнення ґрунтового середовища**

Основні положення теорії напружень, теорії міцності, результатів експериментальних досліджень зводяться до наступного. Деформація пружних тіл складається із пружних та залишкових частин. Стан тіла, в якому воно під дією навантаження і без помітного послаблення зв'язків між частинками отримує значні (в порівнянні з пружними) залишкові деформації, називається пластичним станом тіла.

Критерієм небезпечного стану для пластичних матеріалів приймається поява явища текучості, тобто, поява залишкових деформацій при певних навантаженнях.

Напружені стани, при яких настає пластична деформація або руйнування зв'язків між частинками, називають граничним напруженим станом.

Визначення напруженого стану в будь-якій точці тіла, яке знаходиться під дією зовнішніх сил, зводиться до визначення суми дотичних і нормативних напружень, що виникають на гранях елементарної призми при будь-якій орієнтації її граней. При нескінченно малих розмірах призми, всередині якої знаходиться точка прикладених напружень, які в цій точці можуть бути прийнятими еквівалентними напруженому стану призми.

При однорідному напруженому стані в середовищі напружень вони мають однакову величину і направленість в усіх точках поперечного перерізу, тому їх величина в одній точці характеризує стан в усьому середовищі.

При виконанні інженерних розрахунків для складного напруженого стану об'єкта, необхідно знати граничні напруження, які призводять до пластичної деформації або до руйнування.

На рис. 1.4 приведена відома класична діаграма розтягування, на якій точка 1 характеризує кінець прямолінійної пропорції між напруженнями та величиною деформації, точка 2 – початок текучості, точка 3 – відповідає найбільшому навантаженню, яке витримує матеріал (тимчасовий опір або межа міцності).

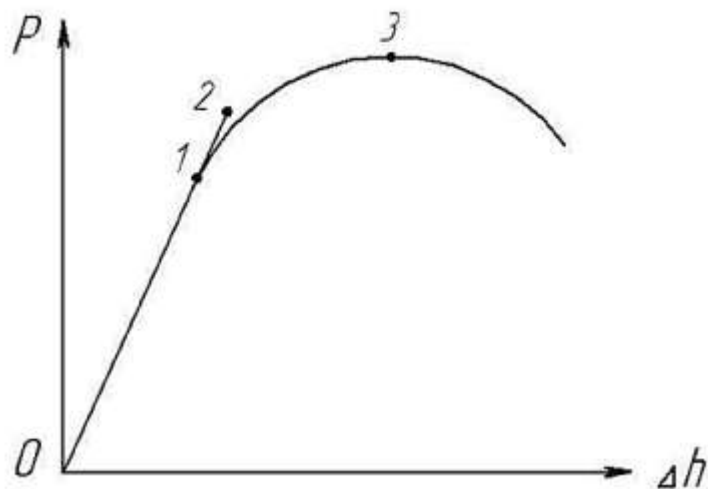


Рис. 1.4 - Діаграма міцності при розтягуванні ґрунтового середовища



У будь-якій точці напруженого тіла існують три взаємно перпендикулярні елементарні площадки, які іменуються головними, по яких відсутні дотичні (тангенційні) напруження. Нормальні напруження до цих елементарних площадок називають головними і позначають  $G_1$ ,  $G_2$  і  $G_3$ .

Напружений стан у будь-якій точці тіла визначається трьома нормальними напруженнями і трьома дотичними, тобто, шістьма компонентами. Якщо взяти головні осі деформації за осі координат, то сукупність точок, які визначають різні граничні напружені стани, утворює поверхню, яку називають граничною поверхнею пластичної деформації:

$$f(G_1, G_2, G_3) = 0 \quad (1.1)$$

Напруження, які виникають в площинах і знаходяться під кутом  $\alpha$  до головних площадок, визначаються із залежності:

$$G_\alpha = G_1 \cos^2 \alpha + G_2 \sin^2 \alpha \quad (1.2)$$

$$\tau_\alpha = \frac{G_1 - G_2}{2} \sin^2 \alpha \quad (1.3)$$

$G_n$  - нормальні напруження, кПа.

На основі вищевикладених основних положень теорії напруження розроблені різні гіпотези, в результаті яких і були розроблені теорії міцності. Перевірку достовірності різних теорій міцності можна провести формулами теорії пружності на ділянці 0–1 діаграми (рис. 1.4), виходячи із умов застосування закону Гука.

При розгляді деформації ґрунтового середовища рушіями МТА, із вище згаданих теорій міцності, найбільшого практичного значення має теорія Кулона-Мора. Вона дозволяє визначити дотичні напруження  $\eta$  при відомих нормальних напруженнях  $G$ , або навпаки, використовуючи залежність (1.2).

Визначення величини  $G_\alpha$  і  $\eta_\alpha$  за допомогою аналітичної залежності можна замінити простою і зручною побудовою кругів Мора (рис. 1.5).



У фазі I відбувається ущільнення ґрунту. Структурні агрегати, зближуючись, рухаються вниз, витискаючи при цьому повітря і воду. Опір втискування штампу інтенсивно зростає. У фазі I вертикальне переміщення частинок ґрунту перевищує горизонтальне переміщення, при цьому перед штампом утворюється ущільнене ядро конусоподібної форми. Поступово рух частинок в горизонтальному напрямі починає переважати над їх рухом вглибину.

Наступає фаза II – зсув ґрунту. При зсуві частинки ґрунту спочатку рухаються в бік даної поверхні, і, по мірі збільшення глибини занурення штампу, втискуються в стійки навколишнього ґрунтового середовища. Щоб не розривати фазу II інтенсивність зростання опору вдавлення штампу знижується і, після стабілізації процесу переміщення частинок ґрунту в горизонтальному напрямі, наближається до мінімального.

У фазі III процес переміщення штампу стабілізується, інтенсивність зростання опору стає мінімальною. Ця фаза відповідає утворенню під штампом зони стійкого ущільненого ядра і періоду настання граничної рівноваги. Для визначення опору ґрунту деформації в механіці ґрунтів (будівельних) користуються повними розрахунковими моделями, які схематизують залежність між навантаженнями і осадкою ґрунту. Для рушіїв, що ущільнюють ґрунтове середовище, найбільш придатними можуть бути дві моделі [16].

Модель за гіпотезою Фусса–Вінклера (рис. 1.7, а) розглядає ґрунтове середовище як систему не пов'язаних між собою пружин (1.4), що спираються на жорстку поверхню, стискання яких зростає прямо пропорційно прикладеному навантаженню.

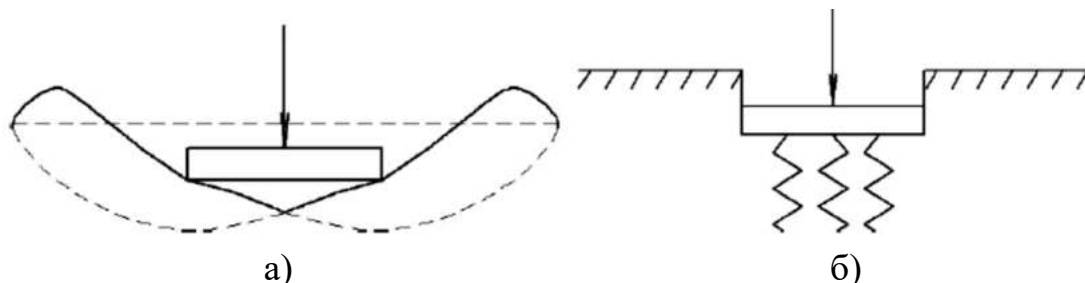


Рис. 1.7 - Розрахункові моделі ґрунту під осадкою

$$P = cz \quad (1.4)$$

де  $c$  – жорсткість пружини, Н/м;

$z$  – стискування, мм.

Опір ґрунту розвивається тільки під штампом. Ґрунт, що розміщений навколо штампку, осадки не має.

Друга модель (рис. 1.7, б) базується на припущенні, що при вдавлюванні штампку в ґрунт в ньому розвиваються зони пластичної деформації, які оцінюються розрахунковою схемою напівпростору, що знаходиться в умовах граничної рівноваги. Під дією штампку ґрунт переходить в пластичний стан. Під штампком сформувався підштамповий клин, який при осадці випучує ґрунт в бокові сторони і частково в сторону даної поверхні.

### **1.3 Аналіз розрахункових методів визначення впливу колісних рушіїв на ґрунт**

Ходові системи сучасних тракторів мають різні типи рушіїв [3, 4, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14]. Тип і конструкція рушія залежать від умов, в яких відбувається експлуатація трактора, запропонованих вимог за величиною впливів на ґрунт, від конструктивних особливостей тракторів та інших факторів [13, 14]. Створення нових конструкцій рушіїв обумовлено необхідністю підвищення тягових показників тракторів, зменшенням витрати палива, але при виконанні головної умови - величина впливів від рушія на ґрунт повинна відповідати допустимим по ДСТУ 4521: 2006 нормам [7].

У загальному випадку опорна поверхня пневмоколіс, що мають відповідний протектор, складається з виступів і западин різних конфігурацій. При цьому лінія перетину радіальної площини, що проходить через вісь обертання колеса і зовнішньої поверхні протектора, не навантаженої зовнішніми силами шини, має кінцевий радіус. Перераховані особливості значно ускладнюють шлях створення

розрахункових залежностей, необхідних для виявлення розподілу контактних тисків пневмошини на опорну поверхню - ґрунт [10, 13]. У зв'язку з цим для спрощення у ряді випадків приймають, що колесо має циліндричну форму, а його контактування починається з плоскої поверхні. Для встановлення функції розподілу тиску, що діє в межах контактної поверхні колеса і опорної основи, необхідно мати залежності між тиском і деформаціями опорної основи та пневмошини, якщо її прогин під дією заданого навантаження є суттєвим, що й відрізняє пневмошину від жорсткого колеса. У наведених нижче формулах, а їх використовували різні автори [8, 9, 10, 13], рекомендується встановлювати взаємозв'язок між тиском (контактним) і деформацією  $h$  опорної поверхні та  $\sigma$  напругою. Ці залежності можна розділити на дві групи.

Слід відзначити, що сучасні МТА виконують технологічні операції обробітку ґрунту з швидкостями 2-4 м/с. Довжина п'ятна контакту коліс сучасних тракторів 0,5-1 м (для трактора ХТЗ-22021  $L_k = 720$  мм), таким чином час впливу одного рушія трактора на ґрунт становить  $t = 0,17$  с. З цього можна зробити висновок, що взаємодію рушіїв трактора з ґрунтом необхідно розглядати як динамічні процеси, які обмежені часом.

### **Висновок за розділом 1**

Ущільнення ґрунту є однією з важливих проблем, що негативно впливає на його якість і врожайність сільськогосподарських культур. Основними причинами цього процесу є вплив рушіїв машинно-тракторних агрегатів, особливо важких машин, які спричиняють значний тиск на поверхню поля. Це створює складнощі при виборі складу машино-тракторного парку для виконання технологічних операцій.

## РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТУ ХОДОВИМИ СИСТЕМАМИ МАШИНО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТИВ

### 2.1 Характеристики ущільнення ґрунту під дією ходової системи МТА

Рівень ущільнення ґрунту, спричинений ходовими системами машино-тракторних агрегатів, визначається згідно з нормами та стандартів «Техніка сільськогосподарська мобільна. Норми дії ходових систем на ґрунт». Основним показником оцінки цього впливу є середній питомий тиск ( $q_{cp}$ , МПа) [7].

$$q_{cp} = \frac{m_e \cdot g}{L \cdot B} \quad (2.1)$$

де  $m_e$  - експлуатаційна маса трактора, кг;

$g$  - прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$L, B$  - розміри контакту, м;

Під час руху машино-тракторного агрегату, ходові системи створюють нерівномірний питомий тиск на ґрунт. Ця нерівномірність залежить від таких параметрів, як кількість опорних котків, крок гусениці, швидкість руху та інші фактори. Важливу роль також відіграє розташування центра ваги трактора, яке значною мірою впливає на розподіл навантаження. У зв'язку з цим основним показником ущільнювальної дії МТА на ґрунт є «максимальний питомий тиск на ґрунт»  $q_{max}$ .

$$q_{max} = \xi_p \cdot q_{cp}, \quad (2.2)$$

де  $\xi_p$  - коефіцієнт нерівномірності навантаження на ґрунт (знаходиться в межах 2,5-5,1).

Для агрегатів з колісними рушіями «максимальний питомий тиск» на ґрунт визначається за формулою (2.3) [7]:

$$q_{\max} = \sqrt{\left[ \left( \frac{G_k}{b \cdot D_p} \right) \right] \left[ \frac{E_k \cdot E}{E_k \pm E} \right]}, \quad (2.3)$$

- де  $E_k, E$  - модуль пружності гуми і деформації ґрунту, кН/м<sup>2</sup>;  
 $G_k$  - вага, яка діє на шину, кН;  
 $D_p$  - середній діаметр шини колеса (з приведеною деф. гуми), м;  
 $b$  - ширина шини, м.

Модуль пружності гуми колеса визначається [7]:

$$E_k = \frac{\omega_k \cdot b \cdot G_k}{f \cdot F_k}, \quad (2.4)$$

- де  $\omega_k$  - коефіцієнт, що ураховує форму контакту шини з ґрунтом;  
 $f, F_k = L, B$

$f, F_k = L, B$  - зминання гуми шини і площа контакту, м, м<sup>2</sup>.

Модуль пружності ґрунту визначається залежністю [7]:

$$E = \frac{[\omega \cdot (q_1 - q) (1 - \sigma^2)]}{S \cdot (z_1 - z_2)}, \quad (2.5)$$

- де  $z_1, z_2$  - занурення плунжера твердоміра, зусилля проникнення  $q_1$  і  $q_2$ ;  
 $S$  - площа плунжера твердоміра; м<sup>2</sup>;  
 $\sigma$  - коефіцієнт зсуву переміщеного ґрунту.

Оцінка впливу ущільнення ґрунту рушіями по сліду агрегату проводиться визначенням критерію щільності [7]:

$$\rho = \rho_0 + \beta \cdot P, \quad (2.6)$$

$$\beta = \frac{R(1 - \sigma^2)}{E \cdot h} \quad (2.7)$$

- де  $\rho_{сн}, \rho_0$  - щільність ґрунту по сліду і до проїзду агрегату, г/см<sup>3</sup>;  
 $\beta$  - коефіцієнт відповідної пропорційності, 1/см<sup>2</sup>;  
 $P$  - показник ущільнюючої дії на ґрунт (формули 2.8 і 2.9), кН/м;  
 $h$  - висота сліду по колії, см.

Показник  $P$  визначає ущільнення рушієм поверхні (кН/м) визначається [7]:

$$P = \omega_k \cdot b_c \cdot q_{\max}, \quad (2.8)$$

де  $b_c$  - ширина профілю колії (для колісних рушіїв ширина профіля гуми), м.

Якщо МТА проходить по одній і тій самій колії та ущільнює ґрунт, тоді формула запишеться наступним чином [7]:

$$P_n = \omega_k \cdot b_c \cdot q_{\max} (1 + \chi \cdot \lg N_p) \quad (2.9)$$

де  $\omega_k$  - коефіцієнт, що ураховує форму контакту шини з ґрунтом, ( $\omega_k \cong 1,25$ );

$\chi$  - показник інтенсивності нерелексивної внутрішньої деформації масиву ґрунту (обирається 1,0...1,5);

$N_p$  – кратність проїздів агрегату по тому місцю поля

Агрегат скомплектований за двовісною схемою, тоді ущільнення ґрунту визначаємо за формулою:

$$P_{2x} = \omega_k \cdot b_c (q_{\max 1} + 0.45 k_{2x} q_{\max 2}) \quad (2.10)$$

де  $k_{2x}$  - коефіцієнт кратності потрапляння задньої осі в колію передньої.

Щільність ґрунту в межах сліду рушія, змінюється лінійно, та залежно від величини  $[P]$ , яка характеризує ущільнювальну дію ходової системи.

Також щільність ґрунту ( $\rho_{сл}$ ) є лінійною функцією логарифма кількості повторних проходів по одному й тому ж сліду.

Допустиме значення ущільнювальної дії тракторів становить  $[P] = 75$  кН/м, що відповідає максимальному питомому тиску на ґрунт  $q_{\max} = 0,1$  МПа [7].

### 2.1.1 Епюри розповсюдження напружень в ґрунті під дією навантажень

Дослідниками встановлено залежності епюр напружень в ґрунті від дії пневматичних коліс тракторів. На рис. 2.1 представлені типові, середні та нормальні напруги від навантаження колеса трактора [13].



Як бачимо, при впливі пневматичного колеса на ґрунт, виникаючі напруги проникають на значну глибину, рівну 90–100 см і зменшуються з глибиною нелінійно. *G.T. Cohron* [5] вважає, що під штампом і під пневматичною шиною є центр ядра ущільнення, що знаходиться в точці перетину двох прямих, проведених з кінців штампa під кутом  $45^\circ$ . Так, для шини трактора К-700 (23,1x26 дюймів, ширина шини 608 мм, зовнішній діаметр 1622 мм) ядро ущільнення буде перебувати на глибині 42 см. Але, як правило, ця величина залежить не тільки від навантаження, але і від виду ґрунту, його вологості і пористості. Найбільше ущільнення не пов'язане однозначно з максимальним додатковим навантаженням. Разом з тим, якщо розглядати середні значення напруження, то величина ущільнення із збільшенням середньої величини напруження збільшується і збільшується середня щільність ґрунту [13].

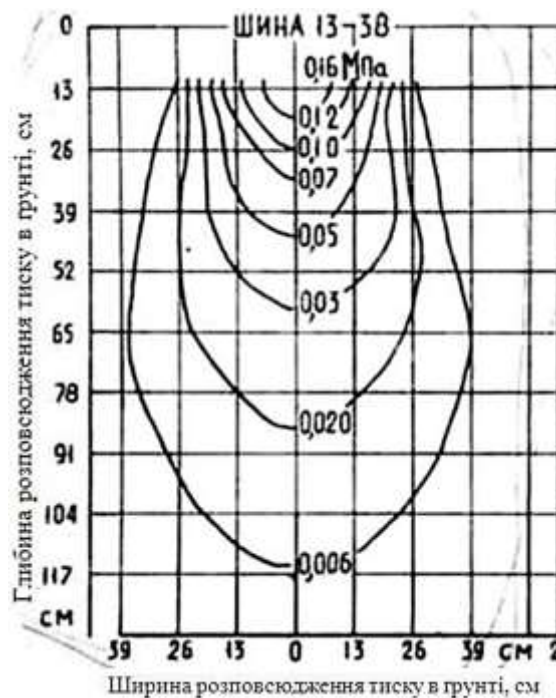


Рис. 2.1 - Схема напружень в ґрунті від пневматичного колеса

Безперервну зміну градієнту розповсюдження тиску в ґрунті можна замінити низкою детермінованих епюр, як це показано на рис. 2.1. При дослідженнях ґрунту проби детерміновано беруться з різних глибин через 5 або 10 см. При

розробці математичної моделі нами будуть досліджуватись процеси, які відбуваються через певний крок зміни глибини. В цьому випадку спрощується порівняння результатів математичної моделі з результатами експериментальних досліджень.

На даний час існують багато досконалих комп'ютерних програм моделювання розповсюдження напружень в суцільному середовищі. Це, наприклад, пакет *Simulation* в програмі *Solidworks*. При точковому прикладанні навантаження до поверхні середовища градієнт напружень зменшується по сферичній поверхні, а моделювання процесів пластичної деформації поки що існує лише для окремих геометричних форм тіл з стабільними механічними властивостями.

Скориставшись згаданими комп'ютерними методиками моделювання пружних деформацій в цільному середовищі, одержимо епюри (рис. 2.2). В реальних умовах колесо трактора контактує з поверхнею ґрунту в певній площині, як показано на рис. 2.1. Відповідно до припущених нами глибин моделювання процесів деформації ґрунту можна стверджувати, що між епюрами в процесі деформації беруть участь різні маси ґрунтів. Для того, щоб визначити величини цих мас ґрунту на підставі проведених досліджень потрібно визначити об'єми ґрунту, які знаходяться між лініями епюр тиску.

Ґрунт нижніх шарів після проходу колеса, завдяки пружним їх властивостям, частково повертається в первинний стан, а у верхніх горизонтах спостерігається значна залишкова деформація. Іншими словами, після проходу колеса частина деформованого ґрунту набуває початкових властивостей (нижче плужної «підшви»), а частина деформованого ґрунту набуває нових фізичних властивостей. Залишкова деформація, зазвичай, акумулюється в плужній «підшві», оскільки вона не обробляється. Шар над «підшвою» щорічно піддається обробці і йому намагаються надати потрібних властивостей шляхом оранки, боронування, дискування, культивації та інших подібних операцій.

а)

б)

Рис. 2.2 - Моделювання деформації ґрунту в пакеті *Simulation* САПР *Solidworks*: а – глибина шару ґрунту 1 м; б – глибина шару ґрунту 5 м

Ущільнення ґрунтів від механічного впливу визначається в загальному випадку трьома величинами:

$$\rho = f(F_p, M_{KM}, Q) \quad (2.1)$$

де  $F_p$  – рушійна сила, що викликає зсув ґрунту в протилежному напрямку руху, Н;

$M_{KM}$  – крутний момент, що викликає зсув ґрунту в напрямку зворотного руху, Н·м;

$Q$  – нормальне навантаження на ґрунт від маси трактора, Н;

## **2.2. Граничний рівень ущільненого ґрунту за показником врожайності сільськогосподарських культур**

Щільність ґрунту є важливим фактором, що суттєво впливає на врожайність сільськогосподарських культур. Тому показником об'ємної маси ґрунту має

залишатися в допустимих межах. У більшості випадків дія ходових систем тракторів і с.-г. машин призводить до надмірного ущільнення ґрунту, що негативно позначається на врожайності культур (рис. 2.3).

Рис. 2.3 - Залежність втрат врожаю ( $D_y$ ) від щільності ґрунту ( $\rho$ ). 1 - ячмінь; 2 - пшениця.

У представленому прикладі щільність ґрунту  $1,30 \text{ г/см}^3$  вважається максимально допустимою. Наукові дослідження підтверджують, що щільність ґрунту є одним із важливих факторів, які негативно впливають на врожайність. Для більшості с.-г. культур оптимальна щільність ґрунту становить в межах  $1,0 \dots 1,3 \text{ г/см}^3$ .

Щільність ґрунту значною мірою залежить від питомого тиску рушіїв машинно-тракторних агрегатів. Відповідно до стандарту, допустимі значення питомого тиску встановлено на рівні  $0,12 \text{ МПа}$  для колісних тракторів і  $0,10 \text{ МПа}$  для гусеничних. Проте фактичні значення питомого тиску в сучасних тракторах перевищують ці нормативи, досягаючи  $0,20\text{--}0,30 \text{ МПа}$  для колісних і  $0,15\text{--}0,20 \text{ МПа}$  для гусеничних тракторів.

Глибина ущільнення ґрунту сучасними тракторами сягає 35–50 см, і це ущільнення може зберігатися до трьох років. Щільність ґрунту також залежить від коефіцієнта буксування, який не повинен перевищувати значення 0,2.

Зниження врожайності сільськогосподарських культур через підвищення щільності та твердості ґрунту може бути описане емпіричною моделлю:

$$Q_y = 1 - \frac{1 - [a(\rho_{opt} - \rho)^2 + b(\rho_{opt} - \rho)]}{W_v} \quad (2.11)$$

де  $\rho_{opt}$  - оптимальна щільність ґрунту, за якої досягається максимальна врожайність, г/см<sup>3</sup>;

$\rho$  - фактичне значення щільності ґрунту, визначене експериментально, г/см<sup>3</sup>;

$a$  і  $b$  - емпіричні коефіцієнти, отримані експериментальним шляхом.

Наприклад, для визначення врожайності цукрового буряка, використовують значення  $a = 13,96$  і  $b = 0,08$ . Максимальна врожайність озимої пшениці спостерігається за щільності ґрунту 1,2–1,3 г/см<sup>3</sup>, а для кукурудзи - 1,1 - 1,2 г/см<sup>3</sup>.

Відхилення фактичної щільності ґрунту від оптимального значення, як у менший, так і у більший бік, призводить до зниження врожайності культури [4].

### 2.3. Взаємозв'язок впливу на ґрунт різних типів ходових систем

Під час руху трактора чи інших машин із ходовими системами по поверхні ґрунту відбувається надмірне ущільнення ґрунтових шарів, яке формується як уздовж, так і впоперек сліду рушія (рис. 2.4).

Глибина ущільнення ґрунту, зокрема чорнозему, при вологості 20 - 23%, сягає 35 - 50 см. Згідно з вимогами та стандартами, питомий тиск на ґрунт не повинен перевищувати 0,1 МПа для тракторів із гусеничним рушієм і 0,12 МПа

для машин із колісним рушієм. Однак фактичний розподілений тиск значно перевищує нормативи:

- для гусеничних рушіїв - 0,15...0,20 МПа,
- для колісних рушіїв - 0,20...0,30 МПа і більше.

Ущільнення ґрунту досягає значної глибини, а надмірне ущільнення підорного шару може призвести до серйозних проблем, які негативно впливають на продуктивність сільськогосподарських культур та стан ґрунту.

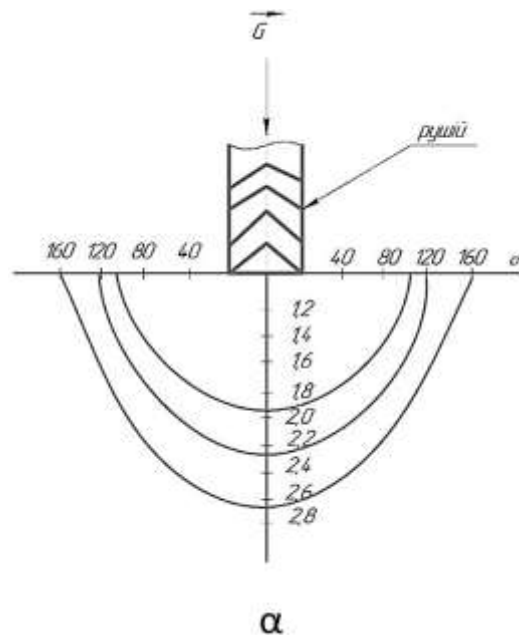


Рис. 2.4 - Зони ущільнення ґрунту під впливом колісного рушія  
 $\alpha$  – ступінь підвищення твердості ґрунту відносно контрольної ділянки.

Параметри та типи рушіїв МТА впливають на рівень ущільнення ґрунту, що також залежить від характеру розподілу навантаження.

У тракторній теорії широке застосування має модель розподілу тиску по опорній площині рушія за лінійним законом (рис. 2.3). У такому випадку питомий тиск на ґрунт розраховується за формулою [8, 10]:

$$q_p = \left( \frac{G_e}{b \cdot L} \right) \cdot \left( \frac{3X_L}{L-1} \right) \quad (2.12)$$

Також беремо до уваги:

$$q_z = \left( \frac{G_e}{b \cdot L} \right) \left( \frac{\frac{2}{3} X_L}{L} \right) \quad (2.13)$$

де  $G_e$  - сила ваги, кН;

$b, L$  - ширина, довжина зони контакту гусеничного рушія, м;

$X_L$  - координата розташування рівнодіючої епюри, м.

Епюри тиску представлені рис. 2.5.

Рис. 2.5 - Розрахункові епюри тиску гусеничного рушія на ґрунт:

1 – напрямне колесо; 2 – опорний коток; 3 – ведуча зірочка;

4 – підтримувальний ролик.

Епюри тиску на ґрунт такого типу побудовані за умовними припущеннями: кількість опорних котків вважається нескінченною; гусеничний рушій моделюється як стрижень, що розташований на пружній поверхні; пружність стрижня є нескінченно великою у порівнянні з еластичністю ґрунту. За таких припущень середній тиск визначається за формулою [10, 11]:

$$q_{cp} = \frac{G_e}{2 \cdot b \cdot L} \quad (2.14)$$

звідки

$$q_{cp} = \frac{m_e \cdot g}{2 \cdot b \cdot L}$$

В дійсності епюра тиску рушіїв трактора на ґрунт нерівномірна, рис. 2.6.

Рис. 2.6. Епюра розподілу тиску на ґрунт від опорних рушіїв сільськогосподарських машин за різними компоновками: 1 - нерівномірний розподіл питомого тиску; 2 - апроксимація значень.

Нерівномірність у розподілі питомого тиску змінюється залежно від конструкції еластичних систем і зазвичай становить 3,1...4,9. Для еластичних систем ці показники визначаються за відповідними розрахунками [11, 12]:

$$\Psi = 1,75 + 0,085l^2 + 1,523 \sqrt{\frac{k}{5,65l - 1}}, \quad (2.15)$$

для напівеластичних підвісок:

$$\Psi_{н.е.} = 1,85 + 0,63l^2 - 0,65m_e^{0,27V} \quad (2.16)$$

де  $l = \frac{L}{n-1} \cdot t$  - середнє відношення віддалі між опорними котками до кроку гусениці.

$L$  - довжина опорної поверхні між рушіями, м;

$n$  - кількість рушіїв по одному борту;

$v = X_g/L$ , відповідно  $L = X_g/v$

$k$  - коефіцієнт нерівномірності розподіленого навантаження на опорні рушії



Вплив довжини трака та кількості опорних котків на рівень питомого тиску трактора на поверхню ґрунту, трактором ХТЗ-181.20 [12]:

$$P_{кр} = 30000\text{Н}, m_e = 7,8\text{т}, L = L_0 + t = 1780 \text{ мм.}$$

Зміщення рівнодійної сили для гусеничних рушіїв становить  $X_g = \pm 100$  мм.

### **Висновок за розділом 2**

Збільшення кількості опорних котків сприяє зменшенню ущільнення ґрунту трактором із кроком трака  $t=200$  мм та шириною  $b=450$  мм що на 19%, тобто з 0,7 МПа до 0,5 МПа.

Отож, зниження питомого тиску можна досягти за рахунок: збільшення довжини трака гусениці до 320 мм без зміни кількості опорних котків  $n \geq 4$ , тобто збільшення кількості опорних котків до шести і більше одночасно зі збільшенням ширини трака приблизно на 15 % ( $b=420\dots 450$  мм).

Модифікація довжини та ширини рушія дозволяє зменшити питомий тиск на ґрунт на 11,5 %. Розрахунки показали, що збільшення довжини бази трактора забезпечує ефективніше зниження тиску на ґрунт (на 10 %), порівняно зі збільшенням ширини рушія.

Ущільнення поверхні ґрунту має пропорційну залежність від кроку встановлення ланок гусеничного рушія, а використання гумово - тросових рушіїв зменшує ущільнювальну дію на ґрунти. Для тракторів із колісною формулою 4x4 із ведучою передньою віссю необхідно забезпечити зміщення центру мас у межах 1300 - 1700 мм, що мінімізує буксування та надмірне ущільнення ґрунту.

## **РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ВПЛИВУ ХОДОВИХ СИСТЕМ МТА НА ПІДОРНІ ШАРИ ҐРУНТУ**

### **3.1 Програма досліджень**

Програмою досліджень передбачено:

1. Дослідити закономірності зміни тиску рушіїв МТА на ґрунтове середовище в залежності від глибини (товщини шару ґрунту між даною поверхнею поля та площиною, в якій проводиться вимір напружень).
2. Розробити методику вимірювання та визначення меж зміни несучої здатності шарів ґрунту в залежності від глибини.
3. Встановити межі природного відновлення деформованого стану ґрунту для типових умов роботи ґрунтообробних МТА.

### **3.2 Методика експериментальних досліджень**

#### **3.2.1 Методика визначення напружень від рушіїв МТА в підорних шарах ґрунтового середовища**

Із всіх відомих способів дослідження величини тиску на ґрунтове середовище рушіями МТА нами вибраний гідростатичний. Від інших (електростатичного, мездозного, магнітного та ін.) цей метод відрізняється відносною трудомісткістю, високими затратами енергії, але є найбільш точним з високою достовірністю отриманих результатів.

Для вирішення цієї проблеми потрібно виміряти напруження від рушіїв МТА в реальних типових ґрунтових умовах за допомогою методів гідростатики. Для визначення процесів взаємодії рушіїв ходових систем МТА з ґрунтовим

середовищем та закономірності поширення цих напружень на глибину досліджень проведено вимірювання згідно методики.

Запропонована методика полягає в наступному: на ділянці поля з однорідними фізико-механічними властивостями викопуються шурфи розміром 1,5x1,0x0,8 м. Кількість шурфів визначається кількістю досліджуваних варіантів МТА. У бокових стінках шурфів ґрунтовим буром просвердлюються, паралельно поверхні поля, отвори глибиною до одного метра через рівні проміжки до дна шурфа. В отвори закладаються гідравлічні датчики, які являють собою місткість із тонкого міцного еластичного матеріалу з виведеною на поверхню прозорою трубкою, кінець якої закріплений на проградуйованому штативі.

Рушії МТА, рухаючись на певній відстані від краю шурфа, перекочуються через об'єми ґрунту, розташовані над гідравлічними датчиками, створюючи в них певні напруження, величина яких змінюється залежно від глибини встановлення датчика. Під дією напружень меніск рідини в трубочці буде рухатись вздовж шкали.

Рух меніска в часі вздовж шкали фіксується за допомогою відеокамери. Після проведення досліду і розшифровки показників відеокамери, встановлюється максимальне відхилення меніска від нульового положення.

Через тарувальний графік визначають величини напружень, які виникають в давачах, розміщених на різних глибинах ґрунтового середовища.

Реалізація запропонованої методики наступна:

1. Вимоги до ділянки, на якій мають проводитись досліди:
  - фізико-механічні властивості ґрунту мають бути однорідні, відхилення щільності та вологості ґрунту не мають перевищувати 3–5 %;
  - нахил поверхні дослідної ділянки не повинен перевищувати 1–2 %;
  - по всій площі ділянки має бути однорідний попередник.
2. На вибраній ділянці проводиться розмітка для проведення досліджень.

3. На розміченій ділянці за допомогою екскаватора викопується 27 шурфів розміром 1,5x1,0x0,8 м (розміри шурфа можуть відрізнятись від передбачених). Виконані екскаватором шурфи підправляються (вирівнюються стінки та дно шурфа).

4. В обох поздовжніх стінках кожного шурфа пробурюється шість отворів діаметром 0,035 м і глибиною 0,9 м перпендикулярно до площини бокової стінки шурфа та перпендикулярно до площини поверхні поля через кожні 0,1 м по глибині (рис. 3.1).

Рис. 3.1 - Схема закладки гідростатичних давачів для вимірювання напружень у ґрунтовому середовищі

5. В просвердлені буром отвори закладаються гідравлічні давачі. Гідравлічні давачі являють собою місткість із тонкого еластичного матеріалу (гуми), з якого виведено прозору пластикову трубку, кінець якої закріплено на штативі, що кріпиться на поверхні поля поряд із шурфом (рис. 3.2). Під час закладки гідравлічні давачі мають щільно прилягати до стінок отвору (щоб не було повітряних подушок). Після закладки гідравлічних давачів у отвори уточнюється рівень води в кожній трубці на шкалі. Вздовж вісі розміщення гідравлічних

давачів проводиться лінія, на відстані 0,5 м від краю шурфа, вздовж якої потім рухаються рушії МТА.

Рис. 3.2 - Схема закладки гідравлічних давачів у ґрунтове середовище на дослідній ділянці

6. МТА рухаються вздовж шурфа поперек гідравлічних давачів. Під час наїзду передніми, а потім задніми рушіями на ґрунт меніски рухаються вздовж шкали і цей рух безпосередньо фіксує відеокамера (рис. 3.2).

7. Після проходу МТА рух меніска кожного давача розшифровується і встановлюється його максимальне відхилення. Ці відхилення за допомогою тарувального графіка дозволяють встановити величину напруження, яке виникає в ґрунтовому середовищі залежно від глибини розміщення давача. Це дає можливість відновити через певні проміжки часу взаємне розміщення рушія, давача та рівня води в трубці. Таким чином, можна зафіксувати мінімальне та максимальне відхилення води в трубці при проходженні рушія МТА над давачем, закладеним на певну глибину і, відповідно, оцінити напруження, які виникають там.

Попередньо необхідно встановити чинники, які мають суттєвий вплив на зміну параметрів, що впливають на підорний шар ґрунту під впливом дії рушіїв МТА. В процесі досліджень можна було змінювати такі параметри: тяговий клас трактора; тиск повітря в шинах.

Кожен дослід проводили в трикратній повторності, що і передбачено схемою досліду. Передбачено можливість проведення повторного експерименту.

Даний дослід виконали в три етапи. На першому етапі було використано три колісні енергетичні засоби класу 1,4; 3 та 4 з тиском у шинах 120 кПа, на другому етапі тиск у даних енергетичних засобах буде зменшено до 100 кПа, а на третьому етапі - до 80 кПа. Також у даному досліді застосовано гусеничний енергетичний засіб класу 5-го тягового класу.

### **Висновок за розділом 3**

У третьому розділі представлено програму та методику експериментальних досліджень впливу ходових систем машинно-тракторних агрегатів (МТА) на підорні шари ґрунту. Розроблено та реалізовано гідростатичний метод вимірювання напружень, що забезпечує високу точність результатів. Експерименти проводилися у три етапи для оцінки впливу тягового класу, тиску в шинах і типу рушіїв на ущільнення ґрунту.

Встановлено закономірності поширення напружень у підорних шарах ґрунту залежно від глибини, а також вплив різних параметрів МТА на ці процеси. Запропонована методика дозволяє не лише вивчати напруження, але й оцінювати відновлення деформованого стану ґрунту. Отримані результати є основою для вдосконалення ходових систем, спрямованих на зменшення деградації ґрунтів і підвищення ефективності роботи МТА.

## РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ УЩІЛЬНЮЮЧОГО ВПЛИВУ ХОДОВИХ СИСТЕМ МТА НА ҐРУНТ

Із багатьох наших досліджень, та дослідників, підтверджується твердження, що зі збільшенням швидкості руху машинно-тракторного агрегату змінюється контактний тиск ходових систем агрегату на поверхню ґрунту, - він варіюється

Встановлено, що підвищення робочої швидкості агрегату сприяє зниженню внутрішніх нормальних напружень у ґрунтовому середовищі. Тобто, зі збільшенням швидкості зменшується час впливу деформатора (рушія) на ґрунт за незмінної експлуатаційної маси.

У такій ситуації ґрунт має властивість зміцнюватися, і може бути враховано [2] через збільшення модуля деформації ґрунту:

$$E = E_0 \left| 1 + \frac{B}{T} \right|, \quad (4.1)$$

де  $E, E_0$  - динамічний і статичний модуль навантажень деформації ґрунту

$B$  - емпіричний коефіцієнт, який визначає тип ґрунту;

$T$  - час прикладання деформації.

На основі результатів Я. С. Агейкіна, який розробив математичну модель для оцінки ущільнюючої дії рушіїв  $q_{(v)}$  залежно від робочої швидкості руху МТА:

$$q_v = \frac{q_{\max}}{1 + \frac{B \cdot V}{L \cdot N}} \quad (4.2)$$

де  $q_{(v)}, q_{(max)}$  - питомий тиск на ґрунтову поверхню при  $V > 0$  і  $V = 0$ ;

$V$  - швидкість руху, м/с;

$L$  - параметри контактної площі з ґрунтом, м;

$N$  - частота повторного проходження рушіїв.

Коефіцієнт  $B$  визначається за формулою:

$$B = \frac{k}{2\varphi} \quad (4.3)$$

де  $k = \frac{1^0}{c};$

$\varphi$  - кут ґрунту природнього відкосу

Деформація масиву ґрунту залежно від швидкості руху агрегату визначається за умови, що робоча швидкість агрегату не перевищує 6 м/с:

$$E_v = E \cdot \left( \frac{1}{\theta \sqrt{V}} \right) \quad (4.4)$$

де  $\theta = 0,09 \dots 0,12$  важких суглинків і  $\theta = 0,05 \dots 0,07$  - для легких ґрунтів

Встановлено, що зі збільшенням швидкості руху тиск у зоні контакту з ґрунтом зростає і може бути описаний за допомогою наступної моделі:

$$q_v = q_{\max} + C_v V^2 \quad (4.5)$$

де  $C_v$  - коефіцієнт пропорційності, рівний 1500 ... 1600 Па/с<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>.

#### **4.1 Результати дослідження залежності питомого тиску на ґрунт від робочої швидкості МТА.**

Результати досліджень свідчать, що питомий тиск на ґрунт для МТА з гусеничними рушійми зростає зі збільшенням робочої швидкості, незалежно від маси агрегату, що відповідає формулами (2.12, 2.12, а). У той же час ущільнення ґрунту, спричинене колісними рушійми, залишається стабільним навіть при підвищеній динаміці руху (див. графіки на рис. 4.1, а та 4.1, б).



а)

б)

Рис. 4.1 - Залежність питомого тиску

На рис. 4.1 представлено залежність питомого тиску на ґрунт від рушія швидкості руху гусеничного трактора ХТЗ-181.20 - (а):  $P_r = 22...26$  кН; також залежність питомого тиску на ґрунт від швидкості руху трактора з різним тиском у шинах (б): 1 - 0,14 МПа; 2 - 0,1 МПа; 3 - 0,06 МПа.

Отримано результати, що демонструють вплив швидкості руху на вертикально-поздовжню деформацію ґрунту (глибину сліду), викликану рушіями тракторів. Розрахунок глибини занурення рушіїв у ґрунт виконано за формулою 4.6:

$$h = \frac{q_{\max(v)}}{E_0} \cdot \frac{1}{C_V} \quad (4.6)$$

де  $q_{\max(v)}$  - питомий показник тиску ходової системи на опорну поверхню, МПа  
 $E_0$  - модуль пружності ґрунту.

Розрахунки показують, що питомий тиск на контактній поверхні залежить від умов роботи, властивостей ґрунту та типів ходових систем МТА. Ця залежність має квадратичний характер і формується під впливом певних взаємодій

факторів, що ускладнює її точне визначення. Для отримання більш достовірних результатів необхідно провести експериментальні дослідження (рис. 4.2).

Рис. 4.2 - Залежність глибини сліду від швидкості руху рушіїв МТА: 1 – ХТЗ-181.20; 2 – трактор Т-150К-09.

#### **4.2 Експериментальні дослідження твердості ґрунту**

Для проведення досліджень використовувалося обладнання, яке включає твердомір Ревякіна, штангенциркуль, міліметровий папір та зразки ґрунту. Твердомір (рис. 4.3, а) складається з направляючого штока 1, телескопічної цанги 2, набору плунжерів 4, пружини 2, планок для кріплення паперу, записувального пристрою та натискних тримачів. Записувальний пристрій пов'язаний із пружиною 2.

Конструкція важелів механізму забезпечує переміщення самописця вертикально (вісь ординат) відповідно до занурення плунжера та горизонтально (вісь абсцис) залежно від стискання пружини, що визначається її жорсткістю.

Твердість ґрунту – це величина об'ємного ущільнення ґрунту, яку визначаємо за допомогою твердоміра та отримуємо графічну залежність (рис. 4.3) заглиблюючись в ґрунт плунжером твердоміра.

На графіку (рис. 4.3) показано три зони. Перша ділянка: «*OA*» – опір деформації, який зростає пропорційно глибині проникнення плунжера в масив на глибину занурення 5...8 см. Друга зона «*AB*» - проміжна. Заглиблюючись плунжером у ґрунт, під його основою утворюється конусоподібний наплив переущільненого ґрунту. На третій ділянці «*BC*» масив зім'ятий напливом, який деформує його, розсуваючи в сторони, відчуючи при цьому постійний опір. Перша фаза деформації є найкоротшою, але має важливе практичне значення, оскільки на ущільнення ґрунту впливають МТА, як правило, не перевищуючи межі першої ділянки за графіком.

Коли плунжер досягає шару ґрунту, дна по приладу, крива «*CD*» різко піднімається вгору, адже плунжер зі штоком натикається на переущільнену «плужну підосвву».

Твердість ґрунту (кПа) визначають за формулою [2, 15-18]:

$$T = \frac{10 \cdot \bar{h} \cdot m}{S} \quad (4.7)$$

де  $\bar{h}$  - середня координата графіка, мм;

$m$  - жорсткість пружини (визначається із тарувальної характеристики згідно епюр), у нашому твердомірі  $m = 10$  Н/мм;

$S$  - площа поперечного перерізу плунжера,  $\text{см}^2$ .

Для характеристик ущільнення ґрунту використовують також коефіцієнт об'ємного зминання ґрунту ( $\text{Н/см}^3$ ) [17]:

$$q = \frac{P_A}{S \cdot l_A} = \frac{h_A \cdot m}{S \cdot l_A} \quad (4.8)$$

де  $P_A$  - зусилля, необхідне для занурення плунжера до межі пропорційності, Н

$l_A$  - занурення плунжера, що дорівнює  $P_A$ , см;

$h_A$  - ордината діаграми, яка відповідає межі пропорційності (точка  $A$ ), мм

На основі даних, отриманих за допомогою твердоміра Ревякіна, було побудовано ряд графічних діаграм по твердості ґрунту. Після обробки цих даних та проведення математичних розрахунків отримано результати дослідження (табл. 4.1, 4.2).

Встановлено, що твердість ґрунту зростає зі збільшенням глибини. Згідно з рекомендаціями, заміри твердості ґрунту виконують на глибинах: 0–10 см, 11–20 см, 21–30 см. Для визначення величини твердості  $h_i$  на заданих глибинах проводять вимірювання через кожні 2 см.

Діапазони глибин і інтервали  $h$  можуть бути змінені відповідно до потреб дослідження [13]. Обробка отриманих даних здійснювалася методами математичної статистики із розрахунком середнього арифметичного значення  $M$ , середнього квадратичного відхилення  $\sigma$  і коефіцієнта варіації  $V$ .

Результати розрахунків у таблицях 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1 - Результати вимірювань твердості ґрунту

Таблиця 4.2 - Результати розрахунків твердості ґрунту

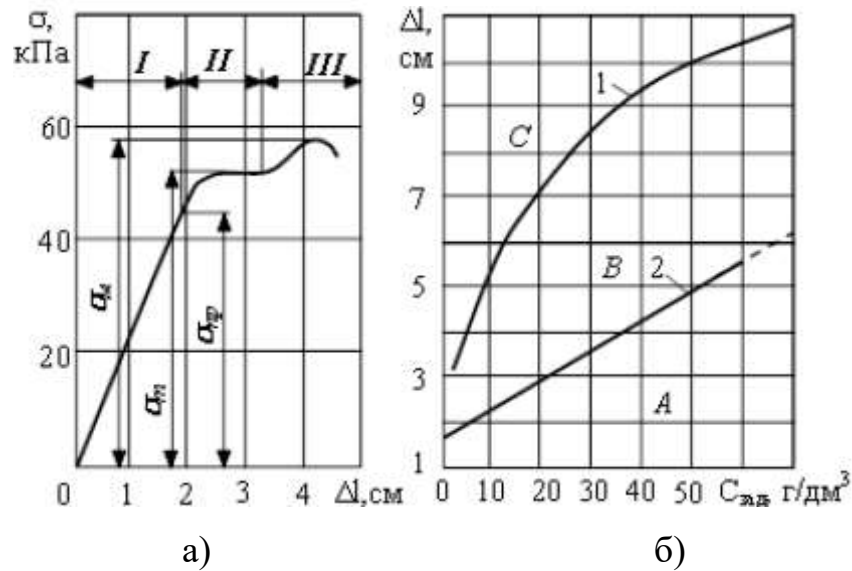


Рис. 4.4. Аналітичні залежності нормальних напружень ґрунту і деформації  $\Delta l$  (а) та граничної деформації ґрунту  $\Delta l$  від ступеня його твердості  $C_{TB}$  (б)

За діаграмою Г.Петрова, визначаємо вплив вологості і механічного складу на відповідність ґрунту (рис. 4.5).

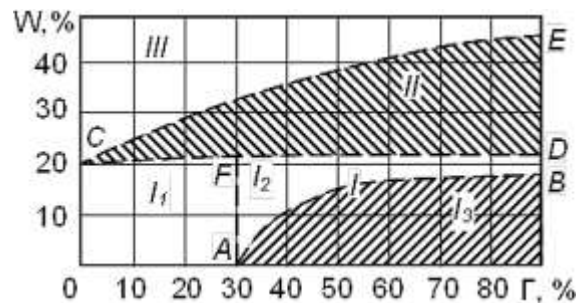


Рис. 4.5 - Залежність властивості реального масиву у відсотках суглинку і вологи  $y=f(r, W)$

На рисунку ділянки «CE» і «CD», які відповідають верхній і нижній межі пластичності. Ці криві ділять площу діаграми на три зони:

- I - тверда (відмічається миттєве кришіння).
- II - еластична (налипання на робочі поверхні органів машин)
- III - текучість (ґрунт перебуває у вигляді текучого тіла).

В свою чергу першу ( $I$ ) ділянку можна розділити ще на три зони  $I_1, I_2$  і  $I_3$ , які відрізняються механічними властивостями при обробці. Нижня частина під-зони  $I_1$  має властивості фізичного піску. Рухаючись по кривій вгору на ділянці підзони пісок переходить у фазу супіску і середній суглинок, а вміст вологи зростає. У нижній підзоні  $I_3$  розміщується щільна суха фізична глина. Рухаючись по діаграмі вліво сухий суглинок, який механічно важко піддається обробітці. У лівій верхній зоні підзони  $I_2$  і є ґрунт, який найбільш бажаний для обробітці.

Задернілість (густа забур'яненість) ґрунту впливає на ефективність його обробітці.

Графік розтягнення зразка задерніного ґрунту (рис. 4.4, а) демонструє три характерні етапи: I – деформацію, яка збільшується пропорційно прикладеному навантаженню; II – деформація зростає без збільшення нормального напруження; III – напруження досягають критичної межі міцності, після чого різко знижуються внаслідок руйнування зразка [16].

### **4.3 Способи зменшення ущільнення ґрунту МТА.**

На основі дослідницьких отриманих результатів, розроблено основні напрямки модернізації сільськогосподарських машин та їх ходових систем. Впровадження цих рішень сприятиме зниженню питомого ущільнення ґрунтового масиву опорними та ведучими елементами рухомих систем.

На рис. 4.6, зображено шляхи, способи та методи удосконалення, щоб знизити ущільнення ґрунту ходових систем [14].



Рис. 4.6 - Шляхи і методи зниження ущільнюючої дії на ґрунт ходових систем МТА

Збільшення робочої ширини захвату МТА та довжини гонів сприяє зменшенню відносної площі ущільнення ґрунту, викликаного дією колісних і гусеничних рушіїв тракторів (рис. 4.7).



Рис. 4.7. - Залежність площі  $F$  поля, ущільненої рушіями, від довжини гонів  $L$  (де  $B$  – ширина захвату агрегату).

Перехід до використання однієї базової колії для машинно-тракторних агрегатів і транспортних засобів, що працюють із різними просапними культурами, суттєво знижує негативний вплив рушіїв на ґрунт (рис. 4.8).

Застосування сучасного технологічного виробництва сільськогосподарської продукції вимагає створення додаткових технологічних проходів на посівних площах для руху великогабаритних машинно-тракторних агрегатів.

Рис. 4.8 - Схема паралельного руху по полю: 1 - збиральний агрегат; 2 - транспортний засіб.

Для оптимізації технологічних процесів необхідно впровадити такий спосіб руху машинно-тракторних агрегатів і транспортних засобів, який передбачає дотримання постійної наміченої траєкторії. Під час виконання робіт важливо забезпечити обробіток лише посівної площі, уникаючи зайвого руху по транспортних коліях.

На рис. 4.9 агрегат оснащений автоматизованою системою управління (АСУ), забезпечує мінімальне ущільнення ґрунту. Завдяки рівномірному розташуванню опорних коліс із низьким тиском у шинах по всій ширині захвату робочого обладнання, ущільнення ґрунту під час проходження агрегату значно менше, у порівнянні з колісним трактором класу 1,4.

Рис. 4.9. Схема широкозахватного агрегату з енергетичним модулем.

1 - енергетичний модуль, 2, 3 - технологічні модулі.

Неспіввісне розміщення опорних котків та рушіїв є ефективним засобом зменшення переущільнення ґрунтового масиву при експлуатації широкозахватного комбінованого агрегату для обробітку ґрунту та посіву, а використання гумово-тросового гусеничного рушія причепа, для перевезення врожаю, як із приводом, так і без нього, також сприяє зниженню негативного впливу на ґрунт (рис. 4.10).

Отже, конструкція гусеничних рушіїв тракторів має значний потенціал для вдосконалення, що дозволяє зменшити контактний тиск на ґрунт і мінімізувати його ущільнення.

#### **4.4 Дослідження спрощених робочих органів для підорного шару ґрунту**

Робочі органи ряду провідних виробників за формою імітують форму ядра з ущільненого ґрунту, що дозволяє знизити енергоємність роботи за рахунок більш раціонального перерозподілу навантаження на пласт і заміни тертя ґрунт-ґрунт тертям метал-ґрунт.

Приклади робочих органів провідних фірм, які працюють за вказаним принципом, вказані на рис. 4.11.

Провідні світові фірми випускають глибокорозпушувачі з різними формами лап, але переважно це стрілчаста форма лап. В той же час слід відзначити, що опір переміщенню цих лап залежить від кута різання і сили тертя ґрунту по довжині лапи, тому, чим менше пересування ґрунту по довжині лапи, тим менший опір робочого органу.

Переважна більшість лап культиваторів розрахована для роботи в кореневмісному шарі ґрунту, тому їх форма - стрілчаста, щоб легше перерізати кореневу систему різних рослин. Але глибокорозпушувачі працюють на глибині більшій ніж розвинута коренева система рослин. На цій глибині зустрічаються корінці, але не такі товсті, не така потужна коренева система, тому виникає робоча гіпотеза, що на глибині орного шару доцільно використовувати стрілчасту форму лап, а на глибині підорного шару слід відмовитись від використання стрілчастої форми лап.

Форма лап обмежується різними геометричними параметрами. Одним з основних параметрів є кут стрілчастості лапи. Величина даного кута в практиці зустрічається в межах від  $90^\circ$  до  $120^\circ$ . У зв'язку з цим, ми запропонували розглянути лапу глибокорозпушувача з кутом  $180^\circ$ , як показано на рис. 4.12.

Елементарна шкідлива робота тертя  $A$ , при переміщенні частки ґрунту по робочій поверхні лапи становить:

$$A = F_T \cdot L,$$

$$F_T = F \cdot f_T.$$

де  $f_T$  – коефіцієнт тертя ґрунту по матеріалу поверхні робочого органу;

$F_T$  – сила тертя частки ґрунту, Н.

Таким чином, величина шкідливої роботи залежить як від сили тертя, так і від довжини шляху взаємодії елементарної частки ґрунту з робочою поверхнею.

За результатами розрахунків видно, що величини механічних напружень, які виникають в місцях їх концентраторів, більш ніж в 2 рази менше границі текучості матеріалу - Сталь 65Г.

Після закінчення підготовки дослідної ділянки агрегат з стрілкою лапою встановлювався на початку дослідної ділянки 1 із налаштуванням на глибину 30 см заглиблення лапи. В процесі досліджень реєструвались показники величини тягового опору. Аналогічно проводилось випробування і на дослідній ділянці 2 та 3. Глибина обробітку буде становити 40 та 50 см відповідно. Після закінчення досліду із визначення тягового опору розпушувача з стрілкою лапою аналогічно проводимо дослідження з прямою лапою.

Попередні порівняння значень величини сили опору показують, що із збільшенням глибини обробітку сила опору лапи глибокорозпушувача зменшується, незалежно від її форми. Це, начебто, суперечить теорії обробітку ґрунту, де із збільшенням глибини обробітку збільшується сила опору ґрунтообробному знаряддю. Але, слід зазначити, що дослідження проводились на полі, яке не оброблялось 2 роки.

Математичне очікування процесу зміни величини сили опору лапи глибокорозпушувача розраховувалось за допомогою програми *Ms Excel*. Ці дослідження підтверджують теоретичні положення, що до енергетичної переваги лапи глибокорозпушувача з прямими крилами при роботі в підорному шарі ґрунту. На глибині 50 см додається збільшення сили опору стійки, що зменшує величину різниці сили опору обробітку.

З наведених середніх даних швидкості МТА та сили опору лапи глибокорозпушувача можна визначити середню споживану потужність. Ці дані наведені на рис. 4.14.

#### **Висновок за розділом 4**

Питомий тиск на ґрунт, який створюється МТА з гусеничними рушійми, збільшується зі зростанням робочої швидкості незалежно від маси агрегату. У той же час ущільнення ґрунту колісними рушійми залишається стабільним навіть за підвищеної динаміки.

Для аналізу результатів використано методи математичної статистики, зокрема обчислено середнє значення ( $M$ ), середнє квадратичне відхилення ( $\sigma$ ), а також коефіцієнт варіації ( $V$ ). Отримані результати наведено в табл. 4.1.

На основі проведених досліджень запропоновано напрями модернізації машин та їх ходових систем, які сприятимуть зниженню питомих показників ущільнення ґрунту опорними та ведучими рушійми. Візуалізація цих пропозицій представлена на рис. 4.6.

Зі збільшенням ширини захвату МТА та довжини гонів спостерігається зменшення відносної площі ущільнення ґрунту колесами і гусеницями тракторів приблизно на 5–6 % (рис. 4.7).

Зниження сили опору і, відповідно, споживаної потужності лапою глибокорозпушувача, із збільшенням глибини обробітку суперечить законам механіки але слід врахувати, що досліди проводились на полі після вирощування багаторічних трав, де коренева система сягає глибини до 30 см.

## РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

### 5.1 Загальні вимоги з охорони праці

Розробка і впровадження нових методів і технологій у сільськогосподарському виробництві вимагає суворого дотримання вимог охорони праці. Зокрема, це стосується експлуатації машинно-тракторних агрегатів, які взаємодіють із ґрунтовим середовищем. Забезпечення безпечних умов праці включає відповідність конструкцій техніки стандартам безпеки, мінімізацію шкідливих впливів на оператора, таких як шум, вібрація та пил, а також запобігання травматизму під час виконання робіт. Оператори повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту, а техніка повинна проходити регулярний технічний огляд.

Для ефективного впровадження вимог охорони праці необхідно проводити систематичне навчання персоналу, який працює з машинно-тракторними агрегатами, з питань безпеки та ризиків, пов'язаних з використанням сільськогосподарської техніки. Це включає як базову підготовку, так і регулярне підвищення кваліфікації операторів у контексті оновлення технологій і стандартів безпеки [18, 19].

Особливо важливою є організація робочих місць на відкритих територіях. Оператори повинні мати доступ до навісів або мобільних укриттів для захисту від погодних умов, таких як дощ, спека або сильний вітер. Крім того, потрібно забезпечити доступ до питної води та засобів для надання першої медичної допомоги в разі травм чи інших надзвичайних ситуацій.

Додатково важливо передбачити план дій на випадок аварійних ситуацій, які можуть виникнути під час експлуатації техніки. Це стосується як механічних пошкоджень обладнання, так і ситуацій, пов'язаних із несприятливими погодними



умовами або пожежною небезпекою. План має включати чіткі інструкції щодо евакуації персоналу, зупинки роботи техніки та надання допомоги постраждалим.

Використання сучасних засобів зв'язку, таких як радіостанції чи мобільні пристрої, дозволяє оперативно передавати інформацію про надзвичайні події та координувати дії персоналу. Це підвищує рівень безпеки та сприяє більш ефективному управлінню робочими процесами.

## 5.2 Зменшення ущільнення ґрунту

Ущільнення ґрунту внаслідок руху техніки є одним із основних негативних факторів, що впливають на його родючість. Вивчення взаємодії ходових систем з ґрунтовим середовищем дозволяє зменшити цей вплив. Досягти цього можна за допомогою використання сучасних низькопрофільних шин, які мають підвищену площу контакту з поверхнею. Це сприяє рівномірному розподілу навантаження.

Іншим ефективним методом є застосування гусеничних рушіїв, які значно знижують питомий тиск на ґрунт. Знижений тиск дозволяє мінімізувати ущільнення ґрунту навіть під час інтенсивної роботи на полях.

Додатково рекомендується оптимізувати маршрути руху машинно-тракторних агрегатів для мінімізації кількості проходів по одному і тому ж місцю. Це дозволяє зберегти структуру ґрунту та уникнути надмірного ущільнення. Важливо враховувати сезонність і стан ґрунту під час роботи техніки, щоб уникнути надмірного впливу в періоди підвищеної вологості.

Підвищення рівня автоматизації та використання систем *GPS*-навігації сприяє точнішому плануванню руху техніки, що знижує ризики ущільнення. Впровадження таких систем також дозволяє ефективно контролювати навантаження на ґрунт і оптимізувати робочі процеси [18, 19].

### 5.3 Екологічна безпека

Захист навколишнього середовища під час експлуатації машинно-тракторних агрегатів передбачає мінімізацію шкідливих впливів на екосистеми. Зменшення викидів шкідливих речовин у атмосферу можливе завдяки використанню двигунів із низьким рівнем шкідливих викидів та екологічно безпечних паливно-мастильних матеріалів. Важливо також забезпечити належну утилізацію відпрацьованих матеріалів.

Особливу увагу слід приділяти технологіям зниження шуму і вібрації, які є додатковим фактором впливу на довкілля. Використання сучасних систем демпфування дозволяє суттєво знизити рівень шуму, що позитивно впливає на екологічний стан навколишніх територій, особливо у зонах, що межують із житловими районами.

Для зменшення негативного впливу техніки на ґрунт необхідно використовувати біорозкладні мастильні матеріали, які мінімізують ризик забруднення при потраплянні у довкілля. Це є особливо актуальним у випадках аварійних ситуацій, які можуть виникати під час роботи машинно-тракторних агрегатів.

Ще одним важливим аспектом є підвищення енергоефективності техніки шляхом впровадження інноваційних двигунів і систем енергозбереження. Це дозволяє не лише зменшити витрати пального, але й скоротити кількість викидів парникових газів, що є основним напрямом у боротьбі зі зміною клімату.

Крім того, доцільним є використання відновлюваних джерел енергії для забезпечення роботи машинно-тракторних агрегатів, таких як сонячні батареї або біопаливо. Це сприяє зменшенню залежності від викопних джерел енергії та забезпечує екологічно чистий цикл виробництва.

## **5.4 Охорона навколишнього середовища**

Однією з головних задач сільськогосподарського виробництва є раціональне використання ґрунтових ресурсів. Зменшення ущільнення ґрунту сприяє поліпшенню його водно-повітряного режиму, що позитивно впливає на врожайність. Водночас, слід враховувати ризики ерозії ґрунтів та їх деградації. Застосування правильних технологій обробітку дозволяє зберігати родючість ґрунту і запобігати його виснаженню.

Крім того, необхідно враховувати специфіку сівозміни, яка може суттєво вплинути на відновлення ґрунтової структури. Правильне планування сівозмін та використання сидератів забезпечують покращення якості ґрунту, його аерації та збільшення вмісту органічних речовин.

Ефективним заходом є також створення захисних лісосмуг, які сприяють зниженню швидкості вітру на полях, зменшенню ерозії та підтримці мікроклімату.

Важливо проводити регулярний моніторинг стану ґрунтів за допомогою сучасних методів, таких як дистанційне зондування або аналіз зразків ґрунту. Це дозволяє вчасно виявляти проблемні ділянки та приймати відповідні заходи для їх усунення.

## **5.5 Пожежна безпека**

Робота з сільськогосподарською технікою передбачає підвищений ризик виникнення пожеж через використання пального, мастил та електрообладнання. Для забезпечення пожежної безпеки всі агрегати повинні бути оснащені сертифікованими вогнегасниками. Важливо також регулярно перевіряти стан електропроводки та паливних систем.

Важливим аспектом є дотримання встановлених правил зберігання та транспортування пального і мастильних матеріалів. Пальні матеріали повинні зберігатися у спеціально обладнаних приміщеннях або ємностях, що виключають

можливість їх займання. Робочі зони мають бути забезпечені протипожежними щитами з необхідним інвентарем, включаючи лопати, пісок і резервуари з водою.

Слід також проводити регулярні навчання для персоналу з питань пожежної безпеки. Це включає тренування щодо дій у випадку займання, використання вогнегасників та евакуації з небезпечних зон. Забезпечення інструктажу дозволяє зменшити ймовірність виникнення надзвичайних ситуацій.

Окрім цього, особливу увагу слід приділяти технічному стану двигунів та вихлопних систем, які можуть стати джерелом займання. Регулярна перевірка і профілактика цих елементів знижує ризики пожеж.

## **5.6 Моніторинг екологічного впливу**

Сучасні системи моніторингу дозволяють ефективно оцінювати вплив техніки на навколишнє середовище. Використання технологій дистанційного зондування та GPS-навігації дозволяє своєчасно виявляти зони з підвищеним ущільненням ґрунту та вживати коригуючих заходів. Інтеграція таких технологій сприяє збереженню екологічного балансу та підвищенню ефективності використання земельних ресурсів.

Окрім цього, важливим аспектом моніторингу є аналіз впливу викидів техніки на якість повітря. Використання датчиків для вимірювання концентрацій шкідливих речовин дозволяє визначати екологічні ризики та розробляти заходи для їх мінімізації.

Моніторинг якості води в районах використання машинно-тракторних агрегатів також є важливим фактором екологічної безпеки. Необхідно впроваджувати системи для виявлення потенційного забруднення води мастильними матеріалами та паливом.

Результати моніторингу повинні регулярно аналізуватись, а відповідні звіти передаватись до органів екологічного контролю для забезпечення виконання природоохоронних заходів.

### **Висновки за розділом 5**

Дотримання вимог охорони праці та захисту навколишнього середовища є важливим фактором підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва. Запропоновані методи мінімізації ущільнення ґрунту, впровадження екологічно безпечних технологій і забезпечення безпеки праці сприяють сталому розвитку аграрного сектору.

Запровадження систем моніторингу дозволяє оперативно виявляти екологічні проблеми та приймати відповідні заходи для їх усунення. Комплексний підхід до охорони праці забезпечує не лише безпеку працівників, а й збереження природних ресурсів для майбутніх поколінь. Використання сучасних технологій, таких як *GPS*-навігація, біорозкладні матеріали та енергоефективні двигуни, сприяє досягненню сталого розвитку та покращенню екологічної ситуації в регіонах активного сільськогосподарського виробництва.

## ВИСНОВОКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

У магістерській роботі виконано дослідження та аналіз впливу ходових систем машинно-тракторних агрегатів на ґрунтове середовище. Отримані результати дозволили сформулювати основні рекомендації щодо зниження ущільнюючої дії агрегатів шляхом удосконалення їх конструктивних параметрів і режимів експлуатації.

Проведені дослідження підтвердили, що значна маса машинно-тракторних агрегатів є основним фактором негативного впливу на механіко-технологічні властивості ґрунту, спричиняючи його ущільнення. Це негативно впливає на водно-повітряний баланс ґрунту, знижує його родючість і погіршує умови для росту рослин.

Збільшуючи кількість опорних котків у конструкції ходових систем дозволить суттєво знизити рівень ущільнення ґрунту. Наприклад, трактор із кроком гусеничного рушія  $t=200$  мм та шириною трака  $b=450$  мм демонструє зменшення питомого тиску на ґрунт на 19 % (з 0,7 МПа до 0,5 МПа).

Зниження питомого тиску також досягається шляхом збільшення довжини трака гусениці (до 320 мм) без змін кількості опорних котків ( $n \geq 4n$ ), а також за рахунок збільшення кількості опорних котків (понад шість) із одночасним розширенням трака на 15 % ( $b=420 \dots 450$  мм).

Модифікація довжини та ширини рушія зумовлює зменшення питомого тиску на ґрунт на 11,5 %. Розрахунки показали, що збільшення довжини бази тракторів має більший позитивний вплив на зниження тиску на ґрунт, ніж збільшення ширини рушія, що дозволяє зменшити тиск на 10 %.

На основі математичного моделювання та аналізу даних розроблено способи оптимізації параметрів ходових систем. Збільшення ширини захвату агрегатів і довжини гонів дозволяє зменшити площу ущільнення, спричинену колесами і гусеницями, що забезпечує покращення структури ґрунту.

Впровадження запропонованих шляхів на основі отриманих даних дозволяє зменшити питомі показники ущільнення ґрунту, створювані опорними та ведучими рушіями. Збільшення ширини захвату МТА та довжини гонів знижує площу ущільнення відносно коліс та гусеницями тракторів приблизно на 5–6 %.

Обґрунтовано доцільність застосування лапи глибокорозпушувача (робочого органу) з кутом стрілчастості  $180^\circ$  на глибинах підорного шару ґрунту, де відсутня потужна коренева система рослин. Використання експериментальної лапи глибокорозпушувача зменшує тяговий опір на 5–7 % на глибині 35–45 см у порівнянні з лапою в якій кут стрілчастості  $55-60^\circ$ .

Розроблено рекомендації для зменшення ущільнення ґрунту шляхом оптимізації конструкцій рушіїв. Зокрема, встановлено, що збільшення кількості опорних котків і розширення гусеничних траків дозволяє знизити контактний тиск на ґрунт. Також доведено, що збільшення довжини бази тракторів ефективніше зменшує тиск на ґрунт порівняно із розширенням ширини рушія.

Результати дослідження є основою для модернізації машинно-тракторних агрегатів, що дасть змогу підвищити їх екологічну ефективність, мінімізувати шкідливий вплив на ґрунтове середовище та сприяти сталому розвитку сільськогосподарського виробництва.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ходова система – ґрунт – урожай / Ксенович І. П., Скотніков В. А., Ляско М. І. Київ : Аграрна наука, 2005. 304 с.
2. Сучасна землеробська механіка / Кулен А., Куіперс Х. ; пер. з англ. А. Є. Габрієляна ; за ред. Ю. А. Смирнова. Київ : Аграрна освіта, 2005. 349 с.
3. Білецький В. Р. Обґрунтування параметрів колісних рушіїв машинно-тракторних агрегатів на основі взаємодії з ґрунтовим середовищем : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Львів : ЛНУ, 2006. 20 с.
4. Ущільнення ґрунту робочими органами та ходовими системами машинно-тракторних агрегатів : матеріали конференції. Київ : УААН, 2015. 85 с.
5. Soil Protection and Conservation Practices / Ed. T. Lal. London : Springer, 2020. 300 p.
6. Улексін В. О. Мостове землеробство. Дніпро : Дніпровський державний аграрний університет, 2005. 118 с.
7. Техніка сільськогосподарська мобільна. Норми дії ходових систем на ґрунт : ДСТУ 4521:2006. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. 9 с.
8. Надикто В. Визначення максимального буксування колісних рушіїв з урахуванням обмеження їх тиску на ґрунт // Техніка і технології АПК. 2014. № 7. С. 34–38.
9. Кутьков Г. М. Трактори і автомобілі. Теорія та технологічні властивості. Київ : Політехніка, 2015. 520 с.
10. Ляско М. І., Рубенчик Є. В. Вплив конструктивних параметрів ходової системи трактора на розподіл питомого тиску по довжині опорної поверхні гусениці // Праці УСГА. Київ : Аграрна наука, 1982. С. 103–106.
11. Емінбейлі З. Н., Бабаєв М. К., Керімов Ю. Б. Особливості ущільнення ґрунту гусеничними тракторами при роботі на схилі // Механізація і електрифікація сільського господарства. 1995. № 8. С. 12–13.



12. Дранішніков О. Огляд і сучасні удосконалення гусеничного рушія // Новини агротехніки. 2004. № 5. С. 24–28.

13. Заєць М. Л., Попроцький С. Л. Вплив на ущільнюючу дію параметрів колісного рушія // Наукові читання–2020 : матеріали науково-практичної конференції, 5–6 березня 2020 р. Житомир : ЖНАЕУ, 2020. С. 121–124.

14. Заєць М. Л., Попроцький С. Л. Вплив ущільнюючої дії на ґрунт параметрів гусеничного рушія // Біоенергетичні системи : матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції, 29 травня 2020 р. Житомир : Поліський національний університет, 2020. С. 138–143.

15. Ґрунтозахисне землеробство : довідник / за ред. І. Н. Безручка, Л. Я. Мальчевської. Київ : Урожай, 1990. 278 с.

16. Царенко О. М., Войтюк Д. Г., Швайко В. М. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів : підручник. Київ : Мета, 2003. 448с.

17. Войтюк Д. Г., Царенко О. М., Швайко В. М. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів : практикум. Київ : Аграрна освіта, 2000. 93 с.

18. Хайліс Г. А., Горбовий А. Ю., Гошко З. О., Ковальов М. М., Налобіна О. О., Юхимчик С. Ф. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів. Луцьк : ЛНТУ, 1998. 268 с.

19. Оцінка ущільнюючого впливу рушіїв тракторів на ґрунт [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.tsatu.edu.ua/mvz/wp-content/uploads/sites/5/1.z.2-ocinka-ushchilnjujuchoho-vplyvu-rushiyiv-traktoriv-na-hrunt.pdf>. Дата доступу: 17.10.2024.