

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра агроінжинірингу

**До захисту
Допускається
Завідувач кафедри**

Шуляк М. Л.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за магістерським рівнем вищої освіти

на тему: **«ТВЕРДІСТЬ ҐРУНТУ В СИСТЕМАХ ТОЧНОГО
ЗЕМЛЕРОБСТВА: КЛАСИФІКАЦІЯ ҐРУНТУ
ЗА ПОКАЗНИКОМ ТВЕРДОСТІ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ ВИБІР
СПОСОБІВ ЙОГО ОБРОБЛЕННЯ»**

Виконав:

Кулемзін В. Г.

Група:

СТЗ 2301–2М

Науковий (керівник):

Івченко О. В.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний

Кафедра агроінжинірингу

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність **208 Агроінженерія**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

агроінжинірингу

_____ Шуляк М. Л.

“__” _____ 202_ року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ (МАГІСТЕРСЬКУ) РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

КУЛЕМЗІН Віталій Геннадійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Твердість ґрунту в системах точного землеробства: класифікація ґрунту за показником твердості та інтелектуальний вибір способів його оброблення»

керівник роботи: Івченко Олександр Володимирович, канд. техн. наук, доц.,

затверджені наказом закладу вищої освіти від “01” березня 2024 року № 668 / ос

2. Строк подання здобувачем роботи: “19” березня 2024 року.

3. Вихідні дані до роботи: Технічні вимоги до пенетрометрів різних конструкцій.

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

1) Дослідити сучасний стан та шляхи розвитку питання оцінювання ущільнення орних ґрунтів.

2) Проаналізувати питання ґрунту, як об'єкту вимірювання: принципи та основні показники, що його характеризують.

3) Удосконалити інструментарій визначення опору проникнення для конкретного ґрунту.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: спрощені схеми дослідження.

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання: “10” січня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної (магістерської) роботи	Строк виконання етапів дипломної (магістерської) роботи	Погоджено з керівником дипломної (магістерської) роботи
1.	Дослідження актуальності проблеми	До 13.09.2024	
2.	Постановка мети та завдань досліджень	До 11.10.2024	
3.	Підготовка розділу «Вступ»	До 18.10.2024	
4.	Підготовка розділу № 1 «Сучасний стан досліджень щодо ущільнення орних ґрунтів»	До 01.11.2024	
5.	Підготовка розділу № 2 «Ґрунт, як об'єкт вимірювання: принципи та основні показники, що його характеризують»	До 29.11.2024	
6.	Підготовка розділу № 3 «Визначення опору проникнення для конкретного ґрунту»	До 10.01.2025	
7.	Підготовка висновків	До 07.03.2025	
8.	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	До 10.03.2025	
9.	Подання роботи на рецензування	До 14.03.2025	
10.	Подання роботи до попереднього захисту	До 19.03.2025	

Здобувач вищої освіти

_____ (підпис)

Кулемзін В. Г.

Керівник дипломної (магістерської) роботи

_____ (підпис)

Івченко О. В.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний

Кафедра агроінжинірингу

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність **208 Агроінженерія**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

агроінжинірингу

_____ Шуляк М. Л.

“__” _____ 202_ року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ (МАГІСТЕРСЬКУ) РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

КУЛЕМЗІН Віталій Геннадійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Твердість ґрунту в системах точного землеробства: класифікація ґрунту за показником твердості та інтелектуальний вибір способів його оброблення»

керівник роботи: Івченко Олександр Володимирович, канд. техн. наук, доц.,

затверджені наказом закладу вищої освіти від “01” березня 2024 року № 668 / ос

2. Строк подання здобувачем роботи: “19” березня 2024 року.

3. Вихідні дані до роботи: Технічні вимоги до пенетрометрів різних конструкцій.

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

1) Дослідити сучасний стан та шляхи розвитку питання оцінювання ущільнення орних ґрунтів.

2) Проаналізувати питання ґрунту, як об'єкту вимірювання: принципи та основні показники, що його характеризують.

3) Удосконалити інструментарій визначення опору проникнення для конкретного ґрунту.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: спрощені схеми дослідження.

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання: “10” січня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної (магістерської) роботи	Строк виконання етапів дипломної (магістерської) роботи	Погоджено з керівником дипломної (магістерської) роботи
1.	Дослідження актуальності проблеми	До 13.09.2024	
2.	Постановка мети та завдань досліджень	До 11.10.2024	
3.	Підготовка розділу «Вступ»	До 18.10.2024	
4.	Підготовка розділу № 1 «Сучасний стан досліджень щодо ущільнення орних ґрунтів»	До 01.11.2024	
5.	Підготовка розділу № 2 «Ґрунт, як об'єкт вимірювання: принципи та основні показники, що його характеризують»	До 29.11.2024	
6.	Підготовка розділу № 3 «Визначення опору проникнення для конкретного ґрунту»	До 10.01.2025	
7.	Підготовка висновків	До 07.03.2025	
8.	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	До 10.03.2025	
9.	Подання роботи на рецензування	До 14.03.2025	
10.	Подання роботи до попереднього захисту	До 19.03.2025	

Здобувач вищої освіти

_____ (підпис)

Кулемзін В. Г.

Керівник дипломної (магістерської) роботи

_____ (підпис)

Івченко О. В.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра складається із вступу, трьох розділів, переліку джерел посилань. Повний обсяг кваліфікаційної роботи магістра становить 59 аркушів, у тому числі 6 рисунків, 9 таблиць, бібліографії із 45 джерел на п'яти сторінках.

Військові дії в Україні спричинили значне забруднення ґрунтів, що негативно впливає на екосистему та сільське господарство країни. Це забруднення має як механічний, так і хімічний характер, що призводить до деградації ґрунтів та зниження їх родючості.

Це призводить до ущільнення та руйнування структури ґрунту, порушує водний баланс, сприяє ерозії та знижує родючість земель. Крім того, під час розмінування території часто руйнується гумусовий горизонт, що також негативно впливає на фізико-хімічні властивості ґрунту.

За офіційними даними, понад 30 % території України потенційно заміновано, що робить її однією з найбільш замінованих країн у світі. Це становить приблизно 142 000 км² або 14 200 000 гектарів земель, які потребують обстеження та очищення.

З огляду на масштаб проблеми, розмінування всієї території України може зайняти десятиліття. За оцінками фахівців, щоб розмінувати всю заміновану та забруднену вибухонебезпечними предметами територію за один рік, потрібно залучити понад 30 мільйонів спеціалістів. За десять років – близько 3 мільйонів, а за сто років – не менше 300 тисяч саперів та фахівців з гуманітарного розмінування.

Таким чином, військові дії в Україні спричинили масштабне забруднення ґрунтів, що вимагає значних ресурсів та часу для їх відновлення. Комплексний підхід до розмінування та реабілітації земель є необхідним для забезпечення екологічної безпеки та відновлення сільськогосподарського потенціалу країни.

Відновлення родючості ґрунтів після військових дій є складним та тривалим процесом. Він включає механічне очищення території від залишків боєприпасів, хімічну детоксикацію забруднених ґрунтів та біологічну ремедіацію для відновлення мікрофлори. Також важливим є проведення

моніторингу стану ґрунтів та розробка стратегій їх відновлення з урахуванням регіональних особливостей.

В той же час існує проблема щодо ущільнення та деградації структури ґрунту під час розмінування сільськогосподарських земель спеціальною технікою, оцінка впливу цих процесів на фізико-хімічні властивості ґрунту, водно-повітряний режим і родючість, а також розробка методів мінімізації негативних наслідків для агроєкосистем.

Мета та завдання роботи.

Метою роботи є розробка рекомендацій щодо вибору способів оброблення ґрунту, що має опір проникнення не допустимий для ведення рослинництва на основі проведення визначення ступеня ущільнення та деградації структури ґрунту під час розмінування сільськогосподарських земель спеціальною технікою, оцінка впливу цих процесів на фізико-хімічні властивості ґрунту, водно-повітряний режим і родючість, шляхом удосконалення конструкції пенетрометра.

Для досягнення поставленої мети в роботі були встановлені та вирішені наступні завдання:

1. Сучасний стан досліджень щодо ущільнення орних ґрунтів.
2. Ґрунт, як об'єкт вимірювання: принципи та основні показники, що його характеризують.
3. Визначення опору проникнення для конкретного ґрунту.

Об'єкт дослідження – процес інтелектуального вибору способів оброблення ґрунту, що має опір проникнення не допустимий для ведення рослинництва.

Предмет дослідження – процес вимірювання опору проникнення ґрунту.

ТВЕРДІСТЬ ҐРУНТУ, ОПІР ПРОНИКНЕННЮ, СТУПІНЬ УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТУ, ВИД МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ТВЕРДОГО ҐРУНТУ

ABSTRACT

The master's qualification work consists of an introduction, three chapters, a list of references. The full volume of the master's qualification work is 59 sheets, including 6 figures, 9 tables, a bibliography of 45 sources on five pages.

Military operations in Ukraine have caused significant soil pollution, which negatively affects the ecosystem and agriculture of the country. This pollution is both mechanical and chemical in nature, which leads to soil degradation and a decrease in their fertility.

This leads to compaction and destruction of the soil structure, disrupts the water balance, promotes erosion and reduces land fertility. In addition, during demining of territories, the humus horizon is often destroyed, which also negatively affects the physicochemical properties of the soil.

According to official data, more than 30% of the territory of Ukraine is potentially mined, making it one of the most mined countries in the world. This amounts to approximately 142,000 km² or 14,200,000 hectares of land that needs to be surveyed and cleared.

Given the scale of the problem, demining the entire territory of Ukraine could take decades. According to experts, in order to demine all the mined and contaminated territory with explosives in one year, it is necessary to involve more than 30 million specialists. In ten years - about 3 million, and in a hundred years - at least 300 thousand sappers and humanitarian demining specialists.

Thus, military operations in Ukraine have caused large-scale soil contamination, which requires significant resources and time for their restoration. An integrated approach to demining and land rehabilitation is necessary to ensure environmental safety and restore the country's agricultural potential.

Restoring soil fertility after military operations is a complex and lengthy process. It includes mechanical cleaning of territories from ammunition residues, chemical detoxification of contaminated soils and biological remediation to restore microflora. It is also important to monitor the condition of soils and develop strategies for their restoration, taking into account regional characteristics.

At the same time, there is a problem of compaction and degradation of soil structure during demining of agricultural lands with special equipment, assessment of the impact of these processes on the physicochemical properties of the soil, water-air regime and fertility, as well as development of methods for minimizing negative consequences for agro-ecosystems.

Purpose and objectives of the work.

The purpose of the work is to develop recommendations for the selection of methods for cultivating soil with penetration resistance unacceptable for crop production based on determining the degree of compaction and degradation of the soil structure during demining of agricultural lands with special equipment, assessing the impact of these processes on the physicochemical properties of the soil, the water-air regime and fertility, by improving the design of the penetrometer.

To achieve the goal, the following tasks were set and solved in the work:

1. The current state of research on the compaction of arable soils.
2. Soil as an object of measurement: principles and main indicators that characterize it.
3. Determination of penetration resistance for a specific soil.

The object of research is the process of intellectual selection of methods for cultivating soil with penetration resistance unacceptable for crop production.

The subject of research is the process of measuring soil penetration resistance.

SOIL HARDNESS, PENETRATION RESISTANCE, DEGREE OF SOIL
COMPACTION, TYPE OF MECHANICAL TREATMENT OF HARD SOIL

ЗМІСТ

	с.
Вступ.....	4
Розділ 1 Сучасний стан досліджень щодо ущільнення орних ґрунтів	7
1.1 Загальні відомості	7
1.2 Аналіз процесу ущільнення ґрунтів різних типів і з різними властивостями.....	9
1.3 Основні показники ущільнення (щільності) ґрунту та їх оптимізація	12
1.4 Висновок	17
Розділ 2 Ґрунт, як об’єкт вимірювання: принципи та основні показники, що його характеризують	19
2.1 Принципи вивчення ґрунтів як природного тіла	19
2.2 Ґрунт як фізичне тіло. Предмет фізики ґрунту	20
2.2.1 Загальні характеристики	20
2.2.2 Ґрунт як фізичне тіло.....	20
2.2.3 Основні фізичні властивості ґрунту.....	21
2.2.4 Предмет фізики ґрунту	21
2.2.5 Методи дослідження фізичних властивостей ґрунту.....	21
2.3 Класифікація методів оцінки ґрунтів сільськогосподарського призначення	22
2.3 Фізико-механічні властивості ґрунту	24
2.4 Твердість ґрунту та методи його визначення.....	24
2.5 Висновок	26
Розділ 3 Визначення опору проникнення для конкретного ґрунту	27
3.1 Терміни «твердість ґрунту» та «опір проникнення».....	27
3.2 Оцінка переущільнення ґрунту за критичними значеннями стійкості до проникнення	28
3.3 Методи визначення опору проникненню (твердість ґрунту)	30

3.4 Удосконалення приладу пенетрометра.....	39
3.5 Розроблення рекомендацій щодо інтелектуального вибору способів оброблення ґрунту, що має опір проникнення не допустимий для ведення рослинництва.....	47
3.6 Висновок	51
Висновки	53
Перелік джерел	55

ВСТУП

Актуальність теми. Військові дії в Україні спричинили значне забруднення ґрунтів, що негативно впливає на екосистему та сільське господарство країни. Це забруднення має як механічний, так і хімічний характер, що призводить до деградації ґрунтів та зниження їх родючості.

Можна виділити декілька типів забруднення ґрунтів від військових дій:

- механічне забруднення ґрунтів;
- хімічне забруднення ґрунтів.

До механічного забруднення ґрунтів відноситься:

- пересування важкої військової техніки;
- будівництво оборонних споруд;
- вибухи снарядів.

Це призводить до ущільнення та руйнування структури ґрунту, порушує водний баланс, сприяє ерозії та знижує родючість земель [1, 2, 3]. Крім того, під час розмінування територій часто руйнується гумусовий горизонт, що також негативно впливає на фізико-хімічні властивості ґрунту. [4, 5]

До хімічних забруднювачів належать залишки:

- пального;
- мастильних матеріалів;
- вибухових речовин;
- важких металів.

Ці речовини змінюють природні фізико-хімічні параметри ґрунту, такі як рН та вміст гумусу, що робить землі непридатними для сільськогосподарського використання в довгостроковій перспективі. [4, 6]

За офіційними даними, понад 30 % території України потенційно заміновано, що робить її однією з найбільш замінованих країн у світі. Це становить приблизно 142 000 км² або 14 200 000 гектарів земель, які потребують обстеження та очищення. [7]

Вартість розмінування залежить від методів, які використовуються, а також від ступеня та типу забруднення території. Перевірка за допомогою супутникових знімків коштує менше \$1 за гектар. Нетехнічне обстеження обходиться приблизно в \$6 за гектар, тоді як технічне обстеження може коштувати понад \$3 000 за гектар. Очищення землі від вибухонебезпечних предметів може досягати \$30 000 за гектар. [8]

З огляду на масштаб проблеми, розмінування всієї території України може зайняти десятиліття. За оцінками фахівців, щоб розмінувати всю заміновану та забруднену вибухонебезпечними предметами територію за один рік, потрібно залучити понад 30 мільйонів спеціалістів. За десять років — близько 3 мільйонів, а за сто років — не менше 300 тисяч саперів та фахівців з гуманітарного розмінування. [7]

Дослідження показали, що в місцях бойових дій значно зменшується кількість корисних мікроорганізмів у ґрунті. Наприклад, у пробах ґрунту з місць горіння військової техніки кількість бактерій, що засвоюють органічний азот, зменшилася на 34 %, а актиноміцетів — на 49 %. Це свідчить про значний негативний вплив на біологічну активність ґрунтів. [9]

Таким чином, військові дії в Україні спричинили масштабне забруднення ґрунтів, що вимагає значних ресурсів та часу для їх відновлення. Комплексний підхід до розмінування та реабілітації земель є необхідним для забезпечення екологічної безпеки та відновлення сільськогосподарського потенціалу країни.

Відновлення родючості ґрунтів після військових дій є складним та тривалим процесом. Він включає механічне очищення територій від залишків боєприпасів, хімічну детоксикацію забруднених ґрунтів та біологічну ремедіацію для відновлення мікрофлори. Також важливим є проведення моніторингу стану ґрунтів та розробка стратегій їх відновлення з урахуванням регіональних особливостей. [10]

В той же час існує проблема щодо ущільнення та деградації структури ґрунту під час розмінування сільськогосподарських земель спеціальною

технікою, оцінка впливу цих процесів на фізико-хімічні властивості ґрунту, водно-повітряний режим і родючість, а також розробка методів мінімізації негативних наслідків для агроєкосистем.

Мета та завдання роботи.

Метою роботи є розробка рекомендацій щодо вибору способів оброблення ґрунту, що має опір проникнення не допустимий для ведення рослинництва на основі проведення визначення ступеня ущільнення та деградації структури ґрунту під час розмінування сільськогосподарських земель спеціальною технікою, оцінка впливу цих процесів на фізико-хімічні властивості ґрунту, водно-повітряний режим і родючість, шляхом удосконалення конструкції пенетрометра.

Для досягнення поставленої мети в роботі були встановлені та вирішенні наступні **завдання**:

1. Сучасний стан досліджень щодо ущільнення орних ґрунтів.
2. Ґрунт, як об'єкт вимірювання: принципи та основні показники, що його характеризують.
3. Визначення опору проникнення для конкретного ґрунту.

Об'єкт дослідження – процес інтелектуального вибору способів оброблення ґрунту, що має опір проникнення не допустимий для ведення рослинництва.

Предмет дослідження – процес вимірювання опору проникнення ґрунту.

Структура й обсяг кваліфікаційної роботи магістра. Робота складається із вступу, трьох розділів, переліку джерел посилань. Повний обсяг кваліфікаційної роботи магістра становить 59 сторінки, у тому числі шість рисунків, дев'ять таблиць, бібліографії із 45 джерел на п'яти сторінках.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ

ЩОДО УЩІЛЬНЕННЯ ОРНИХ ҐРУНТІВ

1.1 Загальні відомості

Одним з факторів, що обмежують ріст і врожайність сільськогосподарських культур, є надмірне ущільнення ґрунту. Негативним наслідком цього процесу є зниження ефективності використання рослинами кореневого шару. Тим часом, практика показує, що наявність товстого кореневого шару дозволяє рослинам більш повно використовувати вологу і поживні речовини ґрунту і добрив.

У США продуктивність основних польових культур знаходиться в прямій залежності від глибини залягання кореневого шару ґрунту: чим більше його товщина, тим вище відносна продуктивність рослин. Наприклад, при товщині ґрунтового шару, покритого кореневою системою польових культур, 1, 2, 3, 4, 5 і 6 футів (305 мм) їх відносна продуктивність оцінюється відповідно в 35, 60, 75, 85, 95 і 100% [11]. Особливо зростає роль товщини кореневого шару на ділянках з недостатнім забезпеченням вологою. Наприклад, в Індії найважливішим показником стабільності врожаю вважається кількість коренів, які проникли на глибину понад 60 см [12].

У зв'язку з цим фахівці приділяють велику увагу збільшенню товщини, поліпшенню агрохімічних і агрофізичних властивостей ґрунту, в першу чергу орного шару, за рахунок застосування ефективних методів вирощування, застосування органічних і мінеральних добрив, хімічних меліорантів ґрунту. Наприклад, у Німеччині товщина орного шару з 1952 по 1982 рік збільшилася в середньому з 25 до 35 см, в країні практично не залишилося орних земель з низьким вмістом рухомих форм фосфору і калію, значно покращилися фізичні властивості ґрунтів [13].

Створення і збереження товстого родючого кореневого шару в умовах інтенсифікації землеробства обумовлюють необхідність впровадження сортів і гібридів інтенсивного типу, що відрізняються підвищеною здатністю засвоювати фотосинтетично активне випромінювання, створювати оптимальну поверхню листя, поглинати велику кількість макро- і мікроелементів (азот, фосфор, калій, кальцій, магній, сірка, залізо, мідь, йод та ін.) і продуктивно використовувати їх для формування врожаю. Але, з іншого боку, сорти і гібриди інтенсивного типу, як правило, набагато вимогливіші не тільки до загального рівня мінерального живлення, а й до товщини кореневого шару, агрохімічних і агрофізичних властивостей ґрунту, в тому числі до ущільнення.

Ущільнення ґрунту відбувається під впливом природних факторів, таких як дощ, особливо при відсутності рослинного покриву, і гравітаційних сил [56]. Однак вчені і фахівці вважають, що основною причиною ущільнення в останні десятиліття є механічний вплив ходової системи тракторів, комбайнів, ґрунтообробних машин, засобів для внесення в ґрунт органічних і мінеральних добрив, вапна та ін.

Тенденція збільшення ваги тракторів та іншої сільськогосподарської техніки спостерігається в багатьох країнах світу. Наприклад, до 1995 року в Україні трактор ДТ-75 важив 6 тон, трактор Т-150К – 8 тон, а трактор К-701 - 13,5 т. У США середня вага трактора на початку 1968 року становила 4,5 тони, а до початку 1980-х — 6,8 тони. У США основними технічними засобами, що викликають ущільнення ґрунту, вважаються зернозбиральні комбайни (маса при вантажі 14 т і більше) і причепи (з навантаженням на вісь до 20 т), розкидачі гною, а також трактори масою понад 14 тон [14].

За даними Молдавського науково-дослідного інституту ґрунтознавства та агрохімії, при існуючих технологіях вирощування сільськогосподарських культур 60–85 % площі полів до збирання врожаю і до 98 % після збирання ущільнюються ходовими системами, в той час як на значній площі (до 40 %) протягом року спостерігається триразове ущільнення, особливо краю полів,

включаючи поворотні смуги, які піддаються впливу ходових систем 6–20 разів [15]. Крім того, вирощування 2–3 врожаїв однієї або різних культур на рік у багатьох сільськогосподарських зонах неминуче пов'язане зі збільшенням кількості проходів сільськогосподарської техніки в полі.

Збитки від неврожаю через ущільнення ґрунту в США оцінюють приблизно в 2 млрд доларів. [16]. У східних провінціях Канади збиток від ущільнення ґрунту в 1,4 рази більший, ніж від ерозії [17], а ущільнення орних і під поверхневих шарів є однією з основних причин посилення водної ерозії [18].

При вирішенні проблеми боротьби з цим небажаним процесом на перше місце повинен бути висунутий комплекс інженерно-технічних, організаційних і агротехнічних заходів, спрямованих на попередження і ліквідацію надмірного ущільнення ґрунту.

1.2 Аналіз процесу ущільнення ґрунтів різних типів і з різними властивостями

Ущільнення ґрунту прийнято розглядати як процес більш тісного розташування агрегатів під впливом різних факторів, як механічних (в першу чергу тиск від працюючих систем тракторів, робочих органів сільськогосподарської техніки та ін.), Так і природних (гравітаційні сили, атмосферні опади та ін.) [19].

Однак самі ґрунтові агрегати також ущільнюються. За даними співробітників Ротамстедської дослідної станції (Великобританія), кількість пір розміром більше 60 мкм (макропор) в стоячо-глейовому бурому лісовому ґрунті при ущільненні скорочувалася більш ніж в 2 рази, в той час як число пір менше 6 мкм не залежало від ущільнення.

Внаслідок руйнування деяких ґрунтових агрегатів погіршується структура ґрунту. Його прудкість збільшується, особливо на сліді колісних тракторів. Так, за даними Всесоюзного інституту механізації сільського господарства (ВІМ), при полицевої оранці чорнозему без ущільнення ступінь

обсипання шару становив 87 %, на колії гусеничного трактора – 83 %, на колії колісного трактора – 56 %. При цьому на гусениці колісного трактора в 15 разів було більше частинок розміром більше 25 мм, ніж на гусениці гусеничного трактора [20].

Глибина та інтенсивність ущільнення залежать від тиску, який відчуває ґрунт від працюючих систем та робочих органів сільськогосподарської техніки, кількості механічних операцій, типу та властивостей ґрунту, його вологості. Стійкість ґрунту до ущільнення неоднакова. Згідно з узагальненнями ФАО, в північній півкулі вона має тенденцію до збільшення в південному напрямку [21].

Орний шар піддається найбільшому і безпосередньому впливу цих факторів, але ряд авторів наводить дані, що зазвичай істотно страждає більш глибокий (близько 10 см) шар, ніж орний [20]. Практика показує, що в цілому орний шар більш стійкий до ущільнення. На еродованих ґрунтах, де горизонт А був втрачений в більшій чи меншій мірі, зростає небезпека ущільнення [11]. При використанні важких тракторів, особливо на вологих ґрунтах, ущільнення може поширюватися на глибину 500–700 мм та більше.

Інститутом рослинництва в м. Пітра (Чехословаччина) були проведені спеціальні дослідження з метою визначення впливу вологості ґрунту на глибину її ущільнення. Встановлено, що трактор масою 10 т спричиняв ущільнення сухого ґрунту на глибину до 720 мм, на ґрунтах з найменшою вологоємністю — до 900, при перезволоженні — до 1020 мм [22]. У Латвії відзначено ущільнення до глибини 1000–1500 мм на перезволоженому важкому ґрунті, у Франції – до 1100, у Швеції — 1000 мм і більше [23].

Результати досліджень, свідчать про те, що особливо схильні до впливу проточних систем дерново-підзолисті і сірі лісові ґрунти, чорноземні і каштанові ґрунти більш стійкі, що мають відносно високий вміст органічної речовини, нейтральну або слаболужну реакцію, досить високу частку водостійких агрономічно цінних агрегатів. Це, перш за все, чорноземи Західного Сибіру, Зауралля, Північного Казахстану, Північного Кавказу».

Однак ця оцінка занадто загальна. Як показали дослідження, проведені в США, на напівпосушливих землях Великих рівнин чорноземи відносно стійкі до ущільнення. Особливо небезпечні дерново-підзолисті ґрунти на південному сході країни в плані ущільнення [24].

Незалежно від типу, ґрунти з високим вмістом органічної речовини менш схильні до ущільнення, про що свідчать дані, отримані фахівцями з різних країн (США, Бельгія, Канада та ін.).

На основі спільних досліджень вчених з Великобританії та Франції була запропонована формула для визначення прямої кореляції між вмістом водотривких агрегатів у ґрунті розміром 1,4—2,8 мм у (%) та органічної речовини x (%) [25]:

$$Y = 11,57 x + 12,75.$$

$$\text{Коефіцієнт кореляції } r = 0,61.$$

В даний час відсутні достатньо повні експериментальні дані, що дозволяють чітко обґрунтувати критичні значення мінімального вмісту органічної речовини в ґрунті, необхідного для забезпечення стійкості до ущільнення. Багато дослідників відзначають, що існує реальна небезпека ущільнення ґрунту при вмісті в ній органічної речовини нижче 3 %. За оцінками британських фахівців, некарбонатні ґрунти з вмістом органічної речовини понад 4,3 % є досить стабільними за структурою (критичний рівень – 3,4 %).

Зміст органічної речовини, необхідної для забезпечення стійкості ґрунту до ущільнення, багато в чому визначається вмістом в ній глини. За даними досліджень в Міннесоті (США), більш сильне ущільнення спостерігалось на важких пилистих суглинках з 6 % органічної речовини, ніж на середніх суглинках з 4 % органічної речовини [19].

Спільні дослідження вчених з Великобританії та Франції виявили чітку залежність між здатністю ґрунту до ущільнення (%) та вмістом у ньому фізичної глини [25]:

$$x (\%) : y = 0,017x - 0,08.$$

Коефіцієнт кореляції $d = 0,94$.

Наведене рівняння вказує на те, що чим вище вміст фізичної глини в ґрунті (чим важчий її механічний склад), тим більша небезпека ущільнення. Цей висновок підтверджується науковими дослідженнями і практикою сільського господарства в Україні і зарубіжних країнах. Досліди, проведені в Канаді, показали, що індекс ущільнення легких і середніх суглинків знаходиться в межах 0,153–0,163, а важких суглинків – 0,217–0,245 [26].

На структуру ґрунту і стійкість до ущільнення впливає також мінералогічний склад глинистої фракції. Дослідження 67 зразків ґрунту з Баварії (Німеччина) показали, що ґрунти з переважанням «активних» глинистих мінералів (сметит, вермикуліт) є більш стійкими до ущільнення порівняно з ґрунтами, де переважають «неактивні» мінерали (каолініт, флорит), якщо вміст глини становить не менше 25—30% [27].

1.3 Основні показники ущільнення (щільності) ґрунту та їх оптимізація

Основними показниками, що характеризують ущільнення, зазвичай є насипна маса, пористість (загальна, капілярна і некапілярна) і твердість ґрунту [15]. Ці показники взаємопов'язані і мають великий вплив на умови вирощування рослин.

Оптимальні значення агрофізичних і агрохімічних показників різних типів ґрунтів (за даними Інституту ґрунтів імені В.В. Докучаєва) наведені в табл. 1.1 [28].

Таблиця 1.1 – Оптимальні агрофізичні та агрохімічні показники деяких ґрунтів

Показник	Тип ґрунту			
	Звичайні чорноземи	Лісовий сірий	Дерново-підзолистий	Типові сіроземи
Глибина орного шару, см	35	30	27	35
Насипна маса, г/см ³	1,1	1,2	1,25	1,3
Загальна пористість, %	59	55	50	46
Вологоємність, %	30	29	27	25
Технічне обслуговування водонепроникних вузлів, %	60	50	40	25

В цей час насипна маса визнана показником ущільнення ґрунту табл. 1.1. У табл. 1.2 наведені дані про оптимальні значення об'ємної маси деяких типів ґрунтів для зернових, шиповидних і просапних культур [29].

Таблиця 1.2 – Значення рівноважної та оптимальної об'ємної маси для польових культур деяких типів ґрунтів

Ґрунт	Механічний склад	Об'ємна маса ґрунту, г/см ³		
		Рівноваги	оптимальний для сільськогосподарських культур	
			Зерно	Оброблені
Дерново-підзолистий	Зв'язок піском ³	1,5–1,6	–	1,4–1,5
	Супіски	1,3–1,4	1,2–1,35	1,1–1,45
	Суглинні	1,35–1,5	1,1–1,3	1,0–1,2
Дерно-карбонат		1,4–1,5	1,1–1,25	1,0–1,2
Дерновий глей		1,4	1,2–1,4	
Заплава лучна		1,15–1,20		1,0–1,2
Болотна	Ступінь розкладання торфу 35–40 %	0,17–0,18	–	0,23–0,25

Ґрунт	Механічний склад	Об'ємна маса ґрунту, г/см ³		
		Рівноваги	оптимальний для сільськогосподарських культур	
			Зерно	Оброблені
Лісовий сірий	Важкі суглинні	1,4	1,15–1,25	1,0–1,2
Чорнозем	Суглинні	1,0–1,3	1,2–1,3	1,0–1,3

Для умов України на товстих середньогумусних важких суглинних чорноземах оптимальна об'ємна маса була визначена на рівні 1,1–1,2 г/см³, для типових і карбонатних чорноземів Молдови – 1,05–1,20 і 1,10–1,25 г/см³ відповідно [30].

Величина залишкового ущільнення залежить від рівня впливу на ґрунт. У дослідях, проведених на кубанському важкосуглинному чорноземі, було показано, що при одному проході по ґрунту восени гусеничного трактора залишкове ущільнення орного шару, зафіксоване навесні, було в 2 рази менше, ніж після проходження важкого колісного трактора. Зі збільшенням числа проходів цих тракторів на одній колії від 1 до 3 залишкове ущільнення збільшувалося в 1,7 рази.

Оптимальна об'ємна вага неоднакова в плані профілю. За даними Українського науково-дослідного інституту ґрунтознавства і агрохімії для вирощування зернових культур на типовому важкосуглинному чорноземі об'ємна маса в насіннєвому шарі повинна бути в межах 1,2–1,3 г/см³, під насінням – 1,1–1,2, причому небажано, якщо його значення менше 1,0 г/см³ [31]. Ці ж дослідження показали (на картоплі), що в ряду під просапні культури ґрунт повинен бути більш пухким, ніж в міжряддях.

Встановлено, що оптимальна об'ємна маса дерново-підзолистого ґрунту для зернових культур становить 1,1–1,35 г/см³, картоплі – 1,0–1,2 і для багаторічних трав – 1,1–1,2 г/см³ [32].

У табл. 1.3 наведено оптимальну об'ємну масу для середньосуглинних чорноземів.

Встановлені такі оптимальні значення об'ємної маси ґрунтів (г/см³): важкі суглинні та глинисті ґрунти – 1,20–1,35, суглинки та пилисті суглинки – 1,35–1,45, легкі суглинисті ґрунти – 1,40–1,45, піщані та супіщані ґрунти – 1,45–1,55 [33].

Таблиця 1.3 – Оптимальна об'ємна вага середньосуглинистого чорнозему для різних сільськогосподарських культур в Чехословацькій Соціалістичній Республіці

Культура	Оптимальна об'ємна вага, г/см ³
Пшениця озима	1,30–1,45
Ярова	1,25–1,35
Овес, озиме жито	1,25–1,45
Ячмінь ярий	1,25–1,35
Кукурудза, кормові боби	1,15–1,25
Цукровий буряк, картопля	1,15–1,35
Соняшник	1,10–1,30
Червона конюшина	1,20–1,30

Слід зазначити, що від вологозабезпеченості залежить оптимальна об'ємна маса: чим вища вологість ґрунту, тим менша оптимальна об'ємна вага. В умовах польових дослідів на слабовилуженому середньосуглинистому чорноземі в середньому за 4 роки був отриманий найвищий урожай ярої пшениці при об'ємній масі 1,1 г/см³, в посушливі роки – 1,2, в сприятливих умовах зволоження – при 1,0 г/см³ [15]. За даними Українського науково-дослідного інституту ґрунтознавства і агрохімії імені А. Н. Соколовського, в роки з великою кількістю опадів оптимальна об'ємна маса чорноземного ґрунту повинна бути нижчою за норму приблизно на 0,05 г/см³, у посушливі роки – вищою на 0,08 г/см³ [28]. Оптимальна об'ємна маса може бути помітно вищою (на 0,1 або до 0,2 г/см³) при внесенні високих доз мінеральних добрив під зернові [29].

Надмірне розпушування і пов'язана з ним дуже висока пористість можуть негативно позначитися на врожайності. Наприклад, на чорноземному

ґрунті при загальній пористості 50–54 % врожайність зерна ярої пшениці Саратовської 29 в середньому за 3 роки становила 22,3–26,3 ц/га, при загальній пористості 61,7% - всього 17,2 ц/га (табл. 1.4) [34].

Тому надмірно розпушений ґрунт повинен осісти перед посівом або його слід ущільнити катками до оптимального значення.

З точки зору профілю, оптимальна пористість не однакова. Згідно з рекомендаціями пористість у верхній частині орного шару повинна становити 50–60 %, в нижній – 35–45 % [32].

Таблиця 1.4 – Вплив загальної пористості та об'ємної маси чорноземного ґрунту на врожайність пшениці Саратовська 29

Загальна пористість, %	Насипна маса, г/см ³	Урожай Зерна ц/га
61,7	0,94	17,2
59,3	1,00	19,9
54,0	1,12	26,3
52,0	1,17	22,6
50,0	1,22	22,3

За даними Мюнхенського технічного університету (Німеччина), оптимальна пористість становить 43–47 %, тоді як на великі (більше 10 мкм), середні (0,2–10 мкм) і дрібні (менше 0,2 мкм) пори повинні припадати відповідно більше 10, більше 15 і менше 20 % парового простору [35]. При таких великих порах забезпечується безперешкодний ріст і активність коренів, достатня аерація для рослин і ґрунтових мікроорганізмів, інтенсивна інфільтрація вологи. Середні пори утримують доступну рослинам вологу (вищезазначена частка середніх пір зазвичай характерна для добре структурованого ґрунту), волога в дрібних порах є мертвим запасом, так як вона в основному недоступна для рослин. Причому при ущільненні, перш за все, зменшується обсяг і частка великих, а також середніх пір, а частка дрібних пір збільшується.

За даними Науково-дослідного інституту ґрунтознавства і рослинництва в Братиславі (Чехія), оптимальна пористість повинна становити близько 45 %, включаючи більші пори більше 10 % [36]. Важливо відзначити, що оптимальне співвідношення між заповненими водою і повітрям порами неоднаково для різних культур: для кукурудзи – 69 і 31% відповідно, озимої пшениці і ярого ячменю – 74 і 26, картоплі і цукрових буряків – 78 і 22, люцерни – 80 і 20%, червоної конюшини – 88 і 12, капусти – 90 і 10%.

1.4 Висновок

Згідно з висновком Робочої групи з механізації сільського господарства Економічної комісії ФАО для Європи, ризик ущільнення ґрунтів посилюється ще й тим, що він є кумулятивним, що може знизити як ефективну, так і потенційну родючість земель.

Негативні наслідки ущільнення різноманітні:

- погіршується водно-повітряний режим ґрунту і умови мінерального живлення рослин;
- знижуються врожайності сільськогосподарських культур;
- посилюється ерозія ґрунту;
- підвищується забур'яненість посівів, їх зараження хвороботворними бактеріями і шкідниками;
- знижується ефективність добрив;
- зростають витрати матеріальних ресурсів на обробку ґрунту.

З вітчизняних та зарубіжних даних видно, що менша об'ємна маса ґрунту в порівнянні зі злаковими необхідна для картоплі, кукурудзи, цукрових буряків та інших просапних культур. Ярові зернові культури, особливо пшениця і ячмінь, більш вимогливі, ніж озимі жито і пшениця.

Експериментальні дані про оптимальну насипну масу підповерхневого шару в літературі нечисленні і суперечливі, хоча є деякі спроби розробити рекомендації. Наприклад, Національний коледж механізації сільського

господарства в м. Сіслоу (Великобританія) рекомендує зменшити об'ємну масу підповерхневого шару з 1,5–1,6 до приблизно 1,3 г/см³ шляхом систематичного розпушування і, при необхідності, з використанням вапна і добрив. Суперечливість даних обумовлена в основному різними причинами утворення, кількості та діаметра біопор, що проникають глибоко в ґрунт: у підповерхневому шарі біопори різного діаметру від відмерлих коренів можуть займати близько 1 % обсягу, а нори червів (діаметром 2 мм і більше) можуть займати до 0,3–0,6 %. Особливо багато біопор в підповерхневому шарі – під багаторічними травами і після них. Коріння рослин активно використовують їх для проникнення в підповерхневий шар (дорослі корені, що досягають підповерхневого шару, здатні рости з більшою твердістю ґрунту в 1,3–1,5 рази, ніж молоді). У зв'язку з малими розмірами біопори не роблять помітного впливу на об'ємну масу підповерхневого шару.

Для нормального росту і активності кореневої системи слід дотримуватися оптимальне співвідношення між порами різного розміру.

РОЗДІЛ 2

ҐРУНТ, ЯК ОБ'ЄКТ ВИМІРЮВАННЯ: ПРИНЦИПИ ТА ОСНОВНІ ПОКАЗНИКИ, ЩО ЙОГО ХАРАКТЕРИЗУЮТЬ

2.1 Принципи вивчення ґрунтів як природного тіла

Ґрунт є важливою складовою біосфери та виконує низку екологічних, біологічних і господарських функцій. Його вивчення є важливим для забезпечення раціонального використання земельних ресурсів, збереження довкілля та підвищення продуктивності сільського господарства. Основою наукового підходу до вивчення ґрунтів є принципи, які визначають методологію та систематизацію знань про ґрунти як природне тіло [37], зокрема:

1. Принцип генетико-еволюційного підходу

Цей принцип ґрунтується на вивченні ґрунтів у процесі їх формування та розвитку. Він передбачає аналіз факторів ґрунтоутворення (материнська порода, клімат, біота, рельєф, час) і змін ґрунтового профілю під їх впливом. Важливим аспектом є дослідження ґрунтових горизонтів, які відображають історію формування ґрунту [37].

2. Принцип цілісності та системності

Ґрунт розглядається як складна відкрита система, що взаємодіє з іншими компонентами природного середовища. Цей принцип вимагає вивчення ґрунтів у взаємозв'язку з кліматичними, геологічними та біологічними факторами. Аналізуються фізико-хімічні властивості, структура, водний і повітряний режими ґрунту. [37]

3. Принцип просторово-часової мінливості

Ґрунти змінюються у просторі та часі під впливом природних і антропогенних факторів. Важливим завданням є визначення закономірностей цих змін і створення карт ґрунтового покриття. Вивчається динаміка процесів, таких як ерозія, засолення, деградація та відновлення ґрунтів. [37]

4. Принцип екологічної спрямованості

Ґрунт вивчається як важливий компонент екосистеми, що забезпечує біопродуктивність і екологічну рівновагу. Аналізується вплив господарської діяльності на ґрунти, процеси забруднення та шляхи їх відновлення. Особливе значення має оцінка екологічної стійкості ґрунтових систем. [37]

5. Принцип класифікації та діагностики

Важливим аспектом є систематизація знань про ґрунти на основі їх морфологічних, фізико-хімічних і біологічних властивостей. Розробляються класифікаційні схеми, які дозволяють ідентифікувати ґрунти та визначати їх придатність для різних видів використання. [39]

2.2 Ґрунт як фізичне тіло. Предмет фізики ґрунту

2.2.1 Загальні характеристики

Ґрунт є складною системою, що виконує важливі екологічні та господарські функції. Як фізичне тіло, ґрунт має унікальні властивості, що визначають його структуру, склад, щільність, водоутримувальну здатність та інші параметри. Фізика ґрунту є галуззю науки, яка досліджує фізичні властивості та процеси, що відбуваються у ґрунтовому середовищі. Її метою є розуміння механізмів взаємодії між твердою, рідкою та газоподібною фазами ґрунту. [38]

2.2.2 Ґрунт як фізичне тіло

Ґрунт складається з трьох основних фаз: твердого скелета (мінеральні та органічні частинки), рідкої (ґрунтовий розчин) і газоподібної (повітря). Співвідношення цих фаз визначає фізичні характеристики ґрунту [37]:

- Пористість – відсоток пор у ґрунтовому об'ємі, які заповнені водою або повітрям.
- Щільність ґрунту – маса ґрунту в одиниці об'єму, що характеризує ступінь ущільнення.
- Вологість ґрунту – кількість води, що утримується у ґрунтових порах.

- Капілярність – здатність ґрунту утримувати та піднімати воду внаслідок капілярних сил.

2.2.3 Основні фізичні властивості ґрунту

- Структура ґрунту – форма, розмір і взаємне розташування частинок ґрунту, що визначає його фізичні та механічні властивості [37].

- Водопроникність – здатність ґрунту пропускати воду під дією сили тяжіння [37].

- Теплоємність і теплопровідність – здатність ґрунту накопичувати та передавати тепло, що впливає на його температурний режим [37].

- Аерація – забезпечення ґрунту повітрям, необхідним для життєдіяльності ґрунтових організмів та корневих систем [37].

2.2.4 Предмет фізики ґрунту

Фізика ґрунту вивчає процеси, що визначають фізичний стан і динаміку ґрунтових систем. Основні завдання фізики ґрунту [38]:

- Дослідження механічних властивостей ґрунту: міцності, пластичності, стисливості.

- Аналіз гідрофізичних процесів: руху, накопичення та випаровування вологи.

- Вивчення теплових процесів: нагрівання, охолодження та теплового балансу ґрунту.

- Дослідження газообміну та дифузії газів у ґрунтовому середовищі.

2.2.5 Методи дослідження фізичних властивостей ґрунту

- Лабораторні методи: визначення вологості, щільності, капілярності, теплоємності [39].

- Польові дослідження: вимірювання водопроникності, аерації, температурних режимів [39].

- Моделювання: створення математичних моделей фізичних процесів у ґрунті [39].

2.3 Класифікація методів оцінки ґрунтів сільськогосподарського призначення

Методи оцінки ґрунтів сільськогосподарського призначення охоплюють широкий спектр підходів – від фізичних і хімічних до біологічних і економічних. Їх комплексне використання дозволяє об'єктивно оцінити родючість, екологічний стан ґрунтів та розробити ефективні стратегії землекористування. Загальну структуру методів оцінювання ґрунтів сільськогосподарського призначення можна згрупувати наступним чином:

Група 1: Агрофізичні методи

Ці методи досліджують фізичні властивості ґрунтів, які впливають на врожайність і придатність для сільськогосподарського використання:

- Визначення щільності та пористості ґрунту (оцінка фізико-механічних властивостей ґрунту та повітряного режиму).
- Аналіз водоутримувальної здатності (вологість, капілярність, водопроникність).
- Теплофізичні властивості (теплоємність, теплопровідність, температурний режим).

Група 2: Агрохімічні методи

Досліджують хімічний склад ґрунтів, їхню родючість та забезпечення рослин поживними речовинами:

- Визначення вмісту макро- і мікроелементів (азот, фосфор, калій, кальцій, магній).
- Оцінка кислотності (рН ґрунту) (вплив на доступність поживних речовин).
- Аналіз органічної речовини (гумус, вміст органічного вуглецю).

Група 3: Біологічні методи

Вивчають біологічну активність ґрунтів та їхню здатність підтримувати рослинний і мікробіологічний склад:

- Оцінка мікробіологічної активності (кількість і різноманітність мікроорганізмів).
- Біоіндикаторні дослідження (використання рослин та біоорганізмів для оцінки якості ґрунту).

Група 4: Геоботанічні методи

Аналіз рослинного покриву як індикатора родючості та фізико-хімічних властивостей ґрунтів:

- Ідентифікація рослин-індикаторів (визначення ґрунтових умов за флористичним складом).
- Картування рослинності (визначення типу та продуктивності ґрунту через рослинні угруповання).

Група 5: Економічні методи

Оцінюють вартість ґрунтів і їхню ефективність у сільськогосподарському виробництві:

- Бонітування ґрунтів (інтегральна оцінка родючості).
- Економічна оцінка (визначення вартості ґрунту залежно від його продуктивності).

Група 6: Комплексні методи

Поєднують дані з кількох дисциплін для отримання цілісної оцінки ґрунтів:

- Геоінформаційні системи (ГІС) (цифрове картування ґрунтів, аналіз просторових даних).
- Моніторинг ґрунтів (систематичне спостереження за динамікою якості ґрунтів).

2.3 Фізико-механічні властивості ґрунту

Фізико-механічні властивості ґрунту включають:

1. Щільність – маса ґрунту на одиницю об'єму, яка може бути сухою (після висушування) або вологою.
2. Межа міцності – максимальна навантажувальна здатність ґрунту до його руйнування, яка залежить від виду ґрунту (глина, пісок, суглинок).
3. Пластичність – здатність ґрунту змінювати свою форму без руйнування при впливі зовнішніх сил.
4. Стиснення – зміна об'єму ґрунту під дією навантажень, що дозволяє оцінити його стійкість до осідання.
5. Твердість – здатність ґрунту чинити опір зовнішнім силам, що призводять до його деформації.
6. Проникність – здатність ґрунту пропускати воду через свої пори. Це залежить від розміру часток ґрунту та його структури.
7. Коефіцієнт водопоглинання – кількість води, яку ґрунт може ввібрати на одиницю маси або об'єму.

Ці властивості визначають придатність ґрунту для різних цілей, зокрема для будівництва, землеробства та екологічних досліджень.

Відповідно до поставленої мети розглянемо поняття твердості ґрунту та методів його визначення.

2.4 Твердість ґрунту та методи його визначення

Твердість ґрунту є одним із найважливіших фізико-механічних показників, що характеризує його опір механічному впливу та деформації. Цей параметр має вирішальне значення у різних сферах, зокрема в будівництві, сільському господарстві та геотехнічних дослідженнях. [40]

Твердість ґрунту визначається його здатністю чинити опір механічному проникненню або стиску. Вона залежить від таких параметрів, як гранулометричний склад, вологість, щільність та структура ґрунту. Висока

твердість може ускладнювати ріст рослин, а надмірна м'якість – зменшувати несучу здатність ґрунту.

До основних факторів, що визначають твердість ґрунту, належать:

- Гранулометричний склад – глинисті ґрунти зазвичай твердіші, ніж піщані, через їхню зчепленість.
- Вологість – збільшення вмісту води зменшує твердість ґрунту, роблячи його більш пластичним.
- Щільність – чим більша щільність ґрунту, тим він твердіший.
- Органічний склад – гумусові ґрунти мають меншу твердість порівняно з мінеральними.
- Тиск і навантаження – постійне механічне навантаження (наприклад, від техніки або будівель) може спричиняти ущільнення і збільшення твердості.

Існує кілька методів визначення твердості ґрунту:

1. Пенетрометричний метод – використання спеціальних приладів (пенетрометрів), які вимірюють опір ґрунту при зануренні стрижня або конуса.
2. Метод конуса Казагранде – визначення межі пластичності ґрунту за допомогою металевого конуса під певним навантаженням.
3. Лабораторні випробування – тестування зразків ґрунту в спеціальних умовах для визначення його механічних характеристик.
4. Польові експерименти – включають випробування на пробних майданчиках для оцінки несучої здатності ґрунту в природних умовах.

Твердість ґрунту є ключовим параметром, що впливає на його використання в різних галузях. Вона визначається складом, вологістю та іншими фізичними характеристиками ґрунту. Використання різних методів дослідження дозволяє точно оцінити твердість ґрунту, що необхідно для прийняття ефективних рішень у будівництві, сільському господарстві та інших сферах діяльності.

2.5 Висновок

Таким чином, вивчення ґрунтів як природного тіла базується на комплексному підході, що включає аналіз їх генезису, структури, властивостей та екологічних функцій. Дотримання принципів генетико-еволюційного підходу, системності, просторово-часової мінливості, екологічної спрямованості та класифікації дозволяє отримати об'єктивну картину ґрунтового покриву та розробити стратегії його збереження та раціонального використання.

Ґрунт як фізичне тіло є складною багатофазною системою, що характеризується низкою фізичних властивостей, важливих для екології та сільського господарства. Фізика ґрунту досліджує ці властивості та процеси, забезпечуючи наукову основу для ефективного використання та збереження ґрунтових ресурсів. Розуміння фізичних характеристик ґрунту є ключовим для забезпечення продуктивності агроecosystem та збереження природних ресурсів.

РОЗДІЛ 3

ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ ПРОНИКНЕННЯ ДЛЯ КОНКРЕТНОГО ҐРУНТУ

3.1 Терміни «твердість ґрунту» та «опір проникнення»

Традиційно термін «твердість ґрунту» все ще використовується в ґрунтознавстві щодо опору проникненню. Таким чином, опір проникненню та твердість є аналогічними термінами, але використання терміну «опір проникненню» є більш фізично суворим, оскільки твердість – опору матеріалу до вдавнення або подряпин не є фізичною константою, а є складною властивістю, яка залежить як від міцності та пластичності матеріалу, так і від методу Вимірювання.

При високих значеннях цього показника часто помітно знижується схожість насіння і спостерігається значна механічна стійкість розвивається кореневої системи рослин, змінюється водний, повітряний і тепловий ґрунтовий режими, що негативно позначається на розвитку самих рослин. Крім того, опір проникненню ґрунту має великий вплив на тяговий опір при русі машин і знарядь.

Опір проникненню залежить від різноманітних властивостей ґрунту, а також опору стисненню і зсуву. Перш за все, це вологість, при якій проводиться вимірювання, адже, як правило, вимір проводиться в польових умовах. Ця залежність, $R_{pn}(W)$, дуже цікава – вона нелінійна, залежить від агрегатності ґрунту. У піщаних і добре структурованих ґрунтах у міру висихання ґрунту максимальний опір проникненню спостерігається при вологість близька до 0,5–0,6 НВ (тобто близька до ВРК). А при подальшому сушінні опір проникненню знижується, так як ґрунт розпадається на окремі піщинки або заповнювачі. Але в неструктурованому ґрунті або ґрунті з призматичною структурою опір проникненню зростає майже лінійно при зниженні вологості.

3.2 Оцінка переущільнення ґрунту за критичними значеннями стійкості до проникнення

Залежність опору проникненню від властивостей ґрунту вказує на його важливість для оцінки ґрунтів. Саме тому його вимірювання є одним з обов'язкових при агрофізичних дослідженнях ґрунтового покриву. Однак завжди необхідно враховувати стан вологи в ґрунті, її вологість, а також метод (прилад), за допомогою якого вимірюється ця важлива характеристика, починають помітно страждати від підвищеної стійкості до проникнення коренів, значенням прийнято вважати близько 3 МПа ($\approx 30 \text{ кг/см}^2$).

У західній науковій літературі, згідно з працями різних авторів, критичні значення цього параметра фізичного стану для ґрунтів середньосуглинистого складу знаходяться в межах 2-3 МПа (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Оцінка переущільнення ґрунту за критичними значеннями стійкості до проникнення [41, 42]

	Критичні значення опору проникненню для відповідних класів за гранулометричним складом					
	Глина	Важкий суглинки	Середній суглинок	Легкі суглинки	Супіски	Пісок
Опір проникнення (МПа) ¹	2,8 – 3,2	3,2–3,7	3,7–4,2	4,5–5,0	5,5	6,0
Для діапазону вологості (% за масою)	28–24	24–20	18–16	15–13	12	10

Примітка 1. Якщо фактична вологість ґрунту вища за вказану в діапазоні, до виміряного значення опору проникненню слід додати 0,25 МПа, а якщо нижчий – 0,25 МПа.

Існують і інші класифікації для оцінки твердості (опору проникненню) ґрунтів (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Вплив опору проникненню на герметизацію (ступінь ущільнення ґрунту) і значення для рослин

Опір проникненню (МПа)	Ступінь ущільнення ґрунту	Значення для рослин
<0,50	Розсипчасті	Чи не впливає
0,5 – 1,25	Середнє ущільнення	Зростання деяких зернових культур може бути обмежений
1,25–2,0	Щільний	Ріст коренів значно обмежується
2–3	Дуже щільний	У такий шар проникають окремі корінці
>3	Надзвичайно щільний	Ріст коренів припинився

Як бачите, дві наведені вище класифікації істотно не відрізняються, а лише доповнюють один одного.

Наслідком залежності значень твердості ґрунту від багатьох ґрунтових і екологічних факторів є висока варіабельність цього показника. Особливо це актуально для поверхневих горизонтів, де, крім впливу природних факторів, на величини опору проникненню активно впливає антропогенний вплив. Аналіз значень опору стиснення в топузолеті на різних глибинах показав, що найбільшим розкидом значень твердості характеризуються поверхневі горизонти. При цьому вплив агротехніки дуже чітко проявляється на глибині 200–250 мм, де чергування пухких і ущільнених зон відповідає напрямку руху сільськогосподарської техніки (по схилу). Більш глибокі шари ґрунту (більш глибокі) оранка вже не впливає. І, як наслідок, помітне збільшення однорідності досліджуваної ділянки за значеннями твердості з глибини 300 мм і нижче. Розподіл значень опору проникненню ґрунту на глибинах від 300 мм і нижче пов'язаний з морфологією ґрунту досліджуваної ділянки. Це дозволяє, зокрема, простежити роль другого гумусового горизонту у формуванні показників твердості ґрунтів.

Саме до ґрунтів з найбільш товстими другими гумусовими горизонтами приурочені пухкі зони в межах дослідної ділянки. Також бувають ситуації, коли більш глибокі шари ґрунту характеризуються більш низькими значеннями твердості, що, на нашу думку, також свідчить про формування підповерхневого ущільнення на глибині 350–400 мм.

3.3 Методи визначення опору проникненню (твердість ґрунту)

Метод заснований на опорі ґрунту при вставці конічного наконечника під впливом статичного навантаження.

Для вимірювання міцності ґрунтів використовуються різні прилади. Принцип роботи одного з таких приладів заснований на вимірюванні сили і глибини введення конуса в ґрунт (рис. 3.1).

Для статичного зондування ґрунтів використовується конус з кутом, що формується на вершині $\varphi = 30^\circ$ і діаметром підстави $d = 36$ мм.

Задачу занурення конуса можна віднести до контактної задачі, в якій залежність зовнішньої сили від зміщення називається нелінійною при вбудовуванні конуса, що обумовлено збільшенням площі контакту при збільшенні сили.

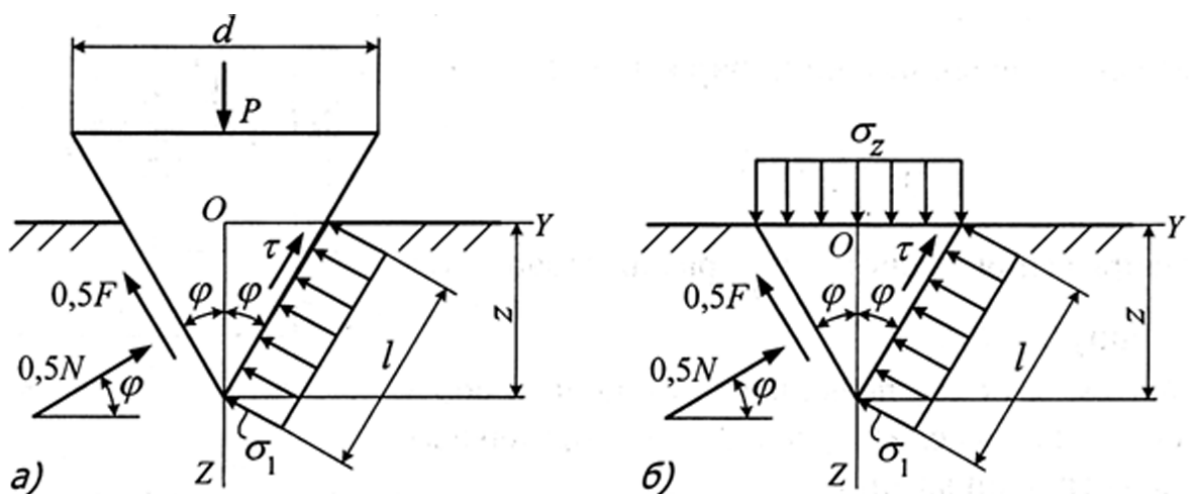


Рисунок 3.1 – Ідеалізовані схеми оформлення:

a) загальна схема сил;

б) сил і напруги, що діють на похованого частину конуса

На поверхні конуса (див. рис. 3.1) показана діаграма рівномірно визначених стандартних напружень σ_1 , що є ідеалізацією задачі, що дозволяє встановити залежність напружень σ_1 від сили P і величини вставки конуса z . У цьому і у всіх інших подібних випадках σ_1 – середнє нормальне напруження на розглянутій поверхні.

У лівій частині малюнка умовно показана половина результуючої нормальної сили на поверхні конуса $0,5N$ і відповідна сила тертя $0,5F$.

В результаті дії нормальних сил

$$N = \sigma_1 \cdot A_K = \sigma_1 \cdot \pi \cdot R \cdot l, \quad (3.1)$$

де A_K – бічна поверхня заглибленої частини конуса;

l – формування бічної поверхні заглибленої частини конуса:

$$l = \frac{z}{\cos \varphi}.$$

Радіус підстави заглибленої частини конуса

$$R = z \operatorname{tg} \varphi.$$

Вираз (3.1) для нормальної сили можна записати так:

$$N = \sigma_1 \pi z^2 \frac{\sin \varphi}{\cos^2 \varphi}. \quad (3.2)$$

Сила тертя об бічну поверхню конуса

$$F = fN. \quad (3.3)$$

Запишемо рівняння рівноваги сил, що діють на конус:

$$\sum Z_i = P - N \sin \varphi - F \cos \varphi = 0. \quad (3.4)$$

Використовуючи вирази для сил, з (24) знаходимо

$$\sigma_1 = \frac{P}{\pi z^2 (\operatorname{tg}^2 \varphi + f \operatorname{tg} \varphi)}. \quad (3.5)$$

Встановимо зв'язок напружень σ_1 на похилих майданчиках з вертикальними напруженнями σ_z (рис. 3.1, б).

З умови рівноваги напружень σ_z створюється сила P , яка еквівалентна силі, що діє при нарузі σ_1 на бічну поверхню конуса.

Виразимо силу P через напруги σ_z :

$$P = \sigma_z \pi R^2 = \sigma_z \pi z^2 \operatorname{tg}^2 \varphi.$$

З рівняння (3.4) знаходимо

$$\sigma_z = 2\sigma_1.$$

Це означає, що нормальні напруження σ_z на горизонтальних колодках дорівнюють подвоєним напруженням σ_1 на похилих колодках.

Можна встановити наступні граничні випадки формули (3.3).

Для суглинків коефіцієнт тертя сталі, що ковзає по ґрунту, становить

$$f = 0,5-0,6.$$

Аналогічні дані для інших ґрунтів містяться в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Коефіцієнт тертя сталі, що ковзає по ґрунту
(за А. Н. Зеленіним)

Тип ґрунтів	$F = \operatorname{tg} \delta$
Пісок, супісок	0,45–0,50
Суглинки	0,50–0,60
Глина (в тому числі суха)	0,60–0,70

Приймаючи кут конуса φ рівним куту тертя сталі об ґрунт ($f = \operatorname{tg} \varphi$), з (3.5) отримуємо для суглинку

$$\sigma_1 \approx \frac{P}{2\pi z^2 \operatorname{tg}^2 \varphi} \approx \frac{P}{2z^2}. \quad (3.6)$$

Або, враховуючи, що $\sigma_z = 2\sigma_1$, отримаємо

$$\sigma_z = \frac{P}{z^2}. \quad (3.7)$$

Якщо за допомогою конуса визначити максимальну силу

$$P = P_{\max},$$

що відповідає максимальній глибині конуса

$z = z_{max} = 0,0312$ м, то можна отримати приблизну формулу для суглинку.

$$\sigma_z = 1027P_{max} \cdot \quad (3.8)$$

Слід зазначити, що в порівнянні з приблизними формулами (3.6), (3.7) для суглинків, загальна формула (3.5) є точною і допускає залежність нормальних напружень σ на похилих майданчиках від глибини занурення конуса z і геометричних параметрів для будь-яких деформованих середовищ.

Опір проникненню визначають спеціальними приладами – пенетрометрами, які раніше називали твердомірами. При введенні зонда пенетрометра в ґрунт відбуваються різноманітні процеси. Найкраще це розглянути на схемі (рис. 3.2).

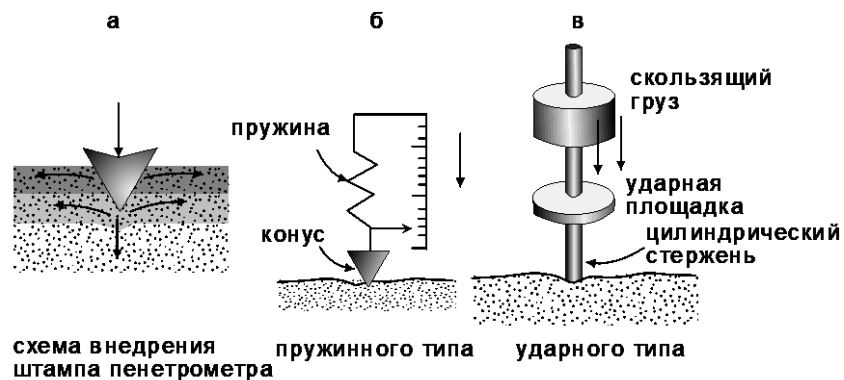


Рисунок 3.2 – Схема впровадження конічного пенетрометра матриці (а) і основні типи пенетрометрів: пружинний (б) і тип удару (в) [43]

Як видно з цієї схеми, при введенні конусного зонда відбуваються найрізноманітніші процеси:

- ущільнення ґрунту,
- зсувні деформації,
- а також тертя металу об ґрунт.

Тому отриманий параметр несе в собі різноманітну інформацію і в більшості випадків важливий як самостійна величина – опір проникненню.

В результаті, використовуючи пенетрометри, ми експериментально визначаємо силу, яка необхідна для введення матриці (конусної або циліндричної) в ґрунт. Цю силу можна виміряти за допомогою пружини, як в пенетрометрі МВ-2 або конструкції Н. А. Качинського.

Твердомір (пенетрометр) Качинського (рис. 3.3) виконаний за типом башти – плунжер занурюється в ґрунт силою розширюваної пружини [44].

В роботі використовуються два плунжера: циліндричний (для стиснення) і конічний (для підклинювання).

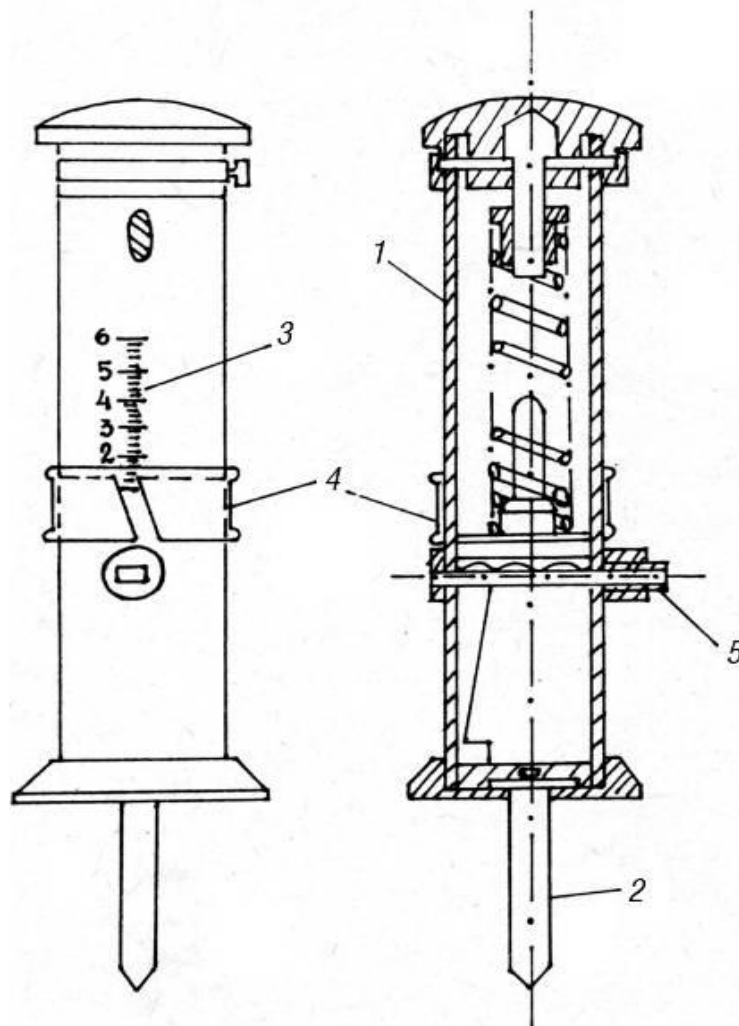


Рисунок 3.3 – Твердомір конструкції Н.А. Качинського:

1 – сталевий корпус приладу;

- 2 – плунжер;
- 3 – шкала;
- 4 – рухоме кільце (показчик);
- 5 – засувка

Мікропенетрометр МВ-2 (рис. 3.4). Цей прилад призначений для польових і лабораторних вимірювань опору проникненню – розклинюванню піщаних і глинистих порід і ґрунтів. Максимальний хід плунжера 26 мм.

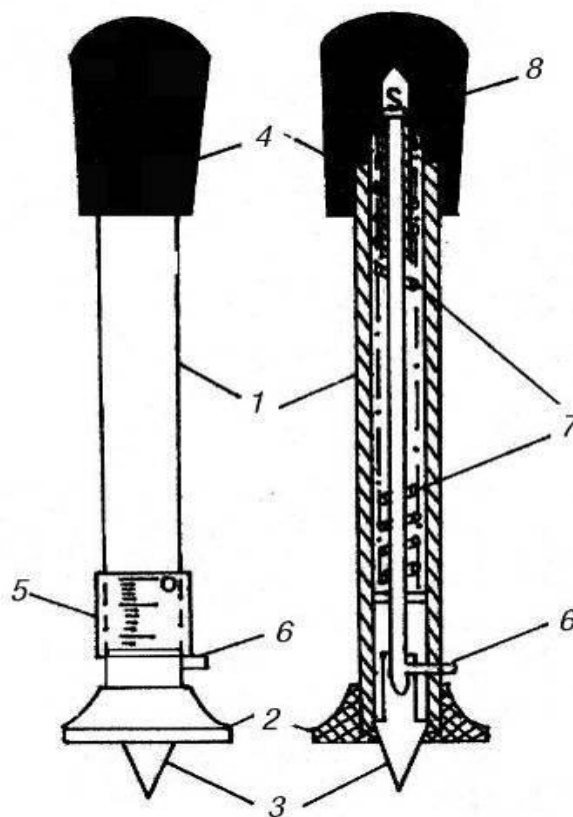


Рисунок 3.4 – Мікропенетрометр МВ-2:

- 1 – корпус;
- 2 – опорний диск;
- 3 – плунжер;
- 4 – пластикова ручка;
- 5 – циліндричний повзунок;
- 6 – шпилька для з'єднання плунжера зі штоком;

7 – пружина;

8 – регулювальна гайка

При роботі з вищезазначеними пенетрометрами однією з найважливіших процедур є калібрування пенетрометра. Необхідно регулярно калібрувати пружинні пенетрометри, прикладаючи до пружини відомі ваги (або стискаючи пружину і одночасно вимірюючи навантаження на стиск, наприклад, на вагах, в кг або g) і визначаючи відповідні показання шкали пенетрометра. Значення записаної сили (F) повинна бути пов'язана з постійною площею циліндричної або конусної основи матриці (S), отримуючи значення напруги стиснення (або тиску):

$$P = \frac{F}{S}.$$

Залежність показань шкали пенетрометра від прикладеного навантаження лінійна. Тому для пружинних пенетрометрів (МВ-2 і Качинський, рис. III.5-III.6), необхідно знайти постійну приладу K – величину напруги стиснення (МВ-2) або напруги розтягування (пенетрометр Качинського) за одиничною шкалою (год) (в Па/см або (кг/см²)/см, тобто [тиск/довжина]). А у випадку з пенетрометром Качинського сила вторгнення становитиме

$$P_{\text{репКачинського}} = K \cdot h,$$

а у випадку з мікропенетрометром

$$P_{\text{репмикропенетрометр}} = P_m - K \cdot h,$$

де P_m – натяг пружини при максимальному стисненні (позначка максимальної шкали) на площі конуса пенетрометра, (кг/см²).

Недоліком використання описаних вище пенетрометрів Качинського і МВ-26 є те, що в кожному випадку їх використання необхідно проводити прибирання ділянки на глибині дослідження. Уникнути такої трудомісткої роботи при визначенні маси твердості ґрунту на різних глибинах дозволяє застосування приладів, що призводять до подовження плунжера. Прикладом такого твердоміра є ручний пенетрометр виробництва компанії Eijkelkamp Agrisearch Equipment (Нідерланди) (рис. 3.5). Його конструкцією передбачено вибір конуса в залежності від ступеня твердості ґрунту і висунення плунжера до 3 м.

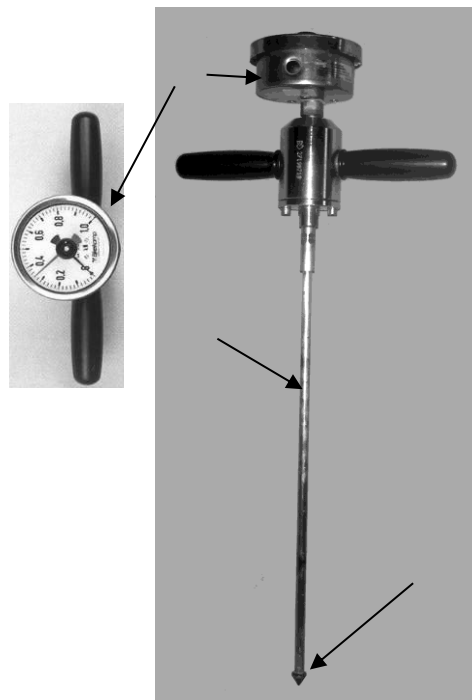


Рисунок 3.5 – Ручний пенетрометр фірми Eijkelkamp Agrisearch Equipment:

1. Вимірювальний прилад.
2. Плунжер.
3. Знімний конус

Опір проникненню для пенетрометрів ударного типу (рис. 2.5.5.с) обчислюється з маси ковзаючої ваги, висоти та кількості падінь. Використовується наступна формула:

$$P_{pen} = n \frac{m \cdot g \cdot h_1}{S \cdot h_2},$$

де n – число падінь ваги m (mg – вага вантажу, кг) з висоти h_1 ,

S – площа зануреного в ґрунт стрижня,

h_2 – глибина закладеного стрижня.

Отриманий розмір дорівнює (кг/см²).

Вимірювач статичний пенетрометр СПГ-1 (табл. 3.4) призначений для оперативного контролю опіру ґрунтів земляного полотна і додаткових шарів фундаментів автомобільних доріг, аеродромів та інших земляних споруд.

Статичний пенетрометр СПГ-1 дозволений до застосування на будь-яких ґрунтах, що містять не більше 15% твердих включень з розміром частинок більше 2 мм.

3.4 Удосконалення приладу пенетрометра

Представлено модель удосконалення пенетрометра для визначення фізичних параметрів ґрунту, зокрема, для вивчення твердості ґрунту в горизонтах плуга і плуга на глибину до 800 мм при відпрацюванні агротехніки. Метою моделі є створення малогабаритного приладу для вимірювання твердості ґрунту з метою оцінки фізичних параметрів ґрунту в горизонтах плуга та плуга. Такий технічний результат досягається за рахунок того, що

Таблиця 3.4 – Загальний вигляд і технічні характеристики статичного пенетрометра СПГ-1 [45]

<p>1–силоизмерительное устройство 2–крепежная гайка 3–стержень 4–ограничительная муфта 5–рабочий стержень 6–конус 7–усеченный конус 8–запасная шайба</p>	Тип прибора – плотномер статического действия с силоизмерительным устройством в виде плоскопараллельного динамометра ДК 100	
	Габаритные размеры, мм	580x140x30
	Параметры рабочих наконечников:	
	конуса, мм:	
	угол при вершине	60 °С
	диаметр основания	16
	высота конуса	15
	длина рабочего стержня	150
	усеченного конуса, мм:	
	диаметр основания	10
высота	80	
Диапазон глубины зондирования, мм	0-150	
Диапазон измерения нагрузки, daN	10-100	
Цена деления шкалы, daN	2	
Пределы допускаемой абсолютной погрешности, daN	±3	
Масса прибора, кг	Не более 3	

замість реверсивного електродвигуна з редуктором і шестернею, зчепленої з закріпленою на корпусі рухомою зубчастою рейкою, і закріпленого на цій рейці тензодатчика, штанги і плунжера, всередині корпусу нерухомо встановлені дві зубчасті рейки, а по цим переміщаються рухома каретка з закріпленими в ній шестернями, оборотний електродвигун з редуктором, тензометричний двигун, штанга і плунжер (рис. 3.6).

Прилад включає в себе корпус з підставою, реверсивний двигун з редуктором, тензодатчик, штангу з плунжем, що характеризується тим, що в ньому додатково містяться дві зубчасті рейки, закріплені нерухомо всередині корпусу, рухома каретка, на якій закріплені шестерні, реверсивний електродвигун з редуктором і тензодатчиком, до якого шток приєднаний до плунжера, верхня частина якого з'єднана корпусом і зубчастими рейками

пластиною, на якому закріплюється електронний блок, а внизу – за допомогою опорних майданчиків з кронштейнами.

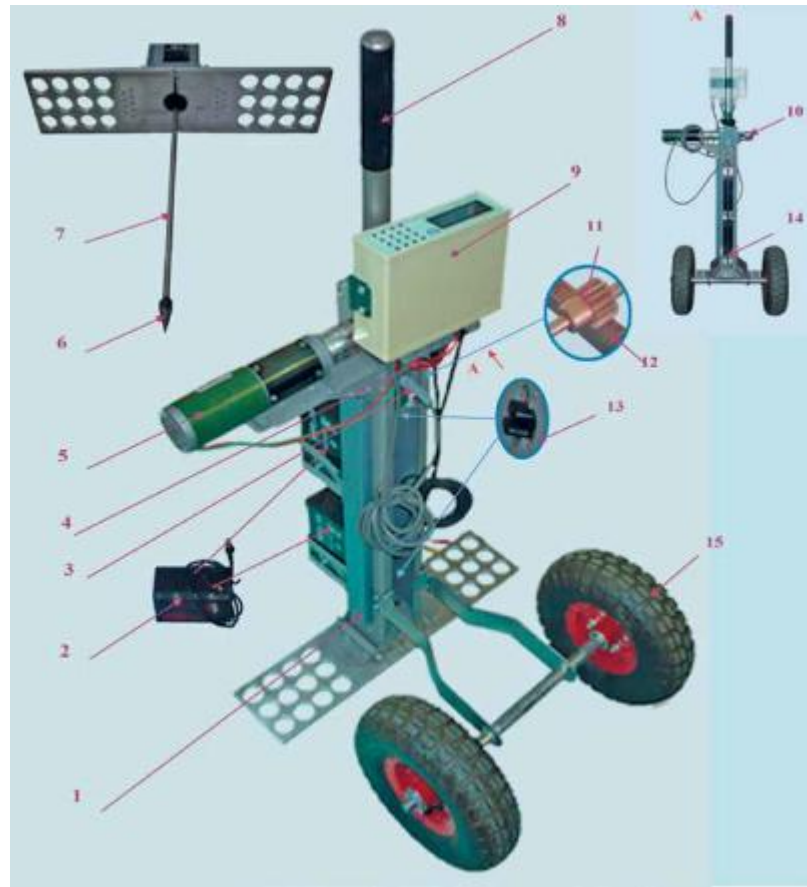


Рисунок 3.6 – Загальний вигляд удосконаленого пенетромтра:

1. Корпус з опорним пристроєм;
2. Акумуляторна батарея;
3. Направляюча каретка з тензOMETричним датчиком;
4. Аварійний вимикач;
5. Реверсивний мотор-редуктор;
6. Плунжерні;
7. Стрижня:
8. Кожух зубчатої рейки – ручка;
9. Електронний блок з панеллю управління і мікрокерованием SPA;
10. Інкрементний осьовий енкодер (датчик кута повороту);
11. Шестерня;
12. Зубчасті рейки;

13. Датчики оптопар;
14. Кронштейн з притискними роликами;
15. Кронштейн з колесами.

Відомо, що твердомір ґрунту НВП «ХАРТРОН-ЕНЕРГО» призначений для визначення фізико-механічних та технологічних властивостей ґрунту шляхом вимірювання опору проникненню плунжера певної форми з одночасною географічною прив'язкою до місцевості за допомогою GPS-приймача. За допомогою циліндричних плунжерів визначають опір ущільненню ґрунту, а за допомогою конічних плунжерів визначають стійкість ґрунту до сили пропанта. Інформація про виконані виміри виводиться на дисплей приладу у вигляді графіків або таблиць. У відомому пристрої плунжери закопуються вручну оператором, що не дозволяє забезпечити сталість швидкості занурення плунжера. Неодноразові дослідження довели, що за інших рівних умов при різних швидкостях обертання плунжера значення вимірюваної твердості ґрунту не збігаються.

Прилад для вимірювання фізичних властивостей ґрунтів, що дозволяє з високою точністю вимірювати твердість ґрунту в полі, представлений у патенті на корисну модель U 214385, IPC GO1N 3/40, виданому 25.10.2022 року «Прилад для вимірювання твердості ґрунту».

Пристрій працює наступним чином.

У заданому місці твердомір розміщують підставою на ґрунті у вертикальному положенні. Тримаючи прилад за верхню опорну плиту, натиснути на ручку. Зусилля передається на рухому пластину, яка, переміщаючись по напрямних штоках, впливає на шток за допомогою рухомого натискного диска і пружини. Стискуючись, пружина вдавлює змінний наконечник в ґрунт.

При переміщенні рухомого натискного диска вниз вушка тягне за собою шток потенціометричного перетворювача лінійного переміщення. Сигнал від датчика надходить на перетворювач, а після перетворення його в одиницю виміру $\text{кг}/\text{см}^2$ виводиться на дисплейний модуль.

Після зняття вантажу з рукоятки пружина розтискається, і наконечник повертається у вихідне положення. Результати зберігаються на модулі індикації (пікове значення) до наступного вимірювання або відключення приладу. У цьому пристрої наконечник також заглиблений за рахунок сил, які оператор прикладає вручну.

При вимірюванні твердості на сильно ущільненому або висохлому ґрунті на рукоятку твердоміра прикладаються великі зусилля для закопування кінчика. На твердомір збільшуються навантаження на кручення, які послаблюють точки кріплення напрямних штанг з верхньою опорною плитою і підставою.

Недоліком цього приладу є те, що штанга занурюється в ґрунт під впливом м'язової сили оператора, швидкість занурення не постійна і при проведенні вимірювань на ущільненому або підсохлому ґрунті іноді зусиль оператора може не вистачити для проведення вимірювань.

Відомий вимірювальний прилад, описаний у патенті на винахід U 2791146, IPC GO1N 3/40, опублікованому 03.03.2023 року «Прилад для вимірювання твердості ґрунту». Цей винахід відноситься до приладів для визначення твердості ґрунту в кореневмісному шарі сільськогосподарських рослин на різних глибинах, в тому числі і на глибинах, що перевищують один метр, із записом отриманих результатів на відеоприладі.

Прилад для визначення твердості ґрунту (твердомір) складається з рукоятки, на якій закріплена паперова платформа, направляючої втулки з верхньою пластиною, вертикальної лінійки, кінцевої планки і вертикальної скоби з рулеткою. У направляючій втулці рухомо встановлений вертикальний стрижень циліндричної форми з індексною пластиною і горизонтальною гайкою. На верхній пластині із зовнішнього боку на горизонтальному кронштейні на різьбовому з'єднанні додатково закріплена відеокамера. А всередині нього знаходиться циліндрична пружина, обмежена в нижній частині нижньою пластиною, закріплена на циліндричному вертикальному стрижні стопорним болтом з контргайкою. На нижньому кінці вертикального

циліндричного стрижня над каліброваним наконечником є додатковий опорний башмак з внутрішнім конічним отвором і виїмкою для каліброваного наконечника. Полотно рулетки додатково шарнірно кріпиться до опорного черевика через кінчик рулетки. Для утримання і регулювання вертикальної лінійки на приладі виконана пластина, яка разом з паперовою платформою і обмежувальної планкою на рукоятці утримується затискачем з вертикальними гайками.

Недоліком цього пристрою є те, що, як і в вищеописаних пристроях, занурення штанги з поршнем здійснюється за рахунок зусиль оператора, вимірювач в приладі являє собою пружину з нерухомим покажчиком і індексною пластиною. Норма пружини може змінюватися з плином часу і, до того ж, залежить від температури навколишнього середовища. Точність вимірювання показників твердості ґрунту, що визначається візуально положенням індексної пластини, що переміщається по вертикальній лінійці, буде невисокою.

Відомий прилад, описаний у патенті на корисну модель U 199862, IPC G01N 9/00, опублікованому 23.09.2020 «Прилад для вимірювання твердості ґрунту для координатного землеробства».

Прилад складається з корпусу з основою, реверсивного електродвигуна з редуктором, шестерні з зубчастою рейкою, тензодатчика, штанги і плунжера, інкрементного енкодера і електронного блоку, до складу якого входить модуль GPS/ГЛОНАСС, закріплений на корпусі приладу і має енергонезалежну пам'ять. Глибина занурення плунжера в ґрунт визначається числом імпульсів інкрементного енкодера. Процес контролю твердості ґрунту здійснюється за допомогою датчика тензодатчика, а результати зберігаються в енергонезалежній пам'яті електронного блоку. Пристрій приводиться в дію реверсивним електродвигуном з редуктором, що працює від акумулятора, встановленим на корпусі пристрою. Передача обертальних рухів від реверсивного електродвигуна, редуктора і редуктора забезпечує зворотно-поступальний рух з'єднаної між собою зубчастої рейки, тензодатчика, штока і

плунжера щодо корпусу. Енкодер, встановлений на валу редуктора, дозволяє визначити швидкість і глибину занурення плунжера. Під впливом опору ґрунту через шток і плунжер тиск передається на датчик тензодатчика, сигнали від якого надходять на електронний блок для подальшого перетворення. Після закінчення вимірювання дані, отримані від датчика тензодатчика, енкодера і координати місця вимірювання записуються в енергонезалежну пам'ять приладу.

Недоліком пристрою є недостатня глибина занурення вантуза – 40 см, що обумовлено конструкцією самого приладу. Рухома частина пристрою, що складається з штанги з плунжером (50 см), каретки з тензодатчиком (15 см) і зубчастої рейки (50 см), визначає загальну висоту приладу ($\approx 1,5$ м). Для вивчення стану ґрунту в горизонтах плуга і плуга необхідно визначити твердість ґрунту на глибину до 80 см.

За сукупністю ознак в якості найближчого аналога прийнятий прилад для вимірювання твердості ґрунту для координатного землеробства (патент корисної моделі U 199862).

Метою корисної моделі є надання можливості моніторингу твердості ґрунту в горизонтах плуга та плуга, автоматизація процесу отримання даних та зберігання всієї послідовності вимірювань у енергонезалежній пам'яті для подальшої статистичної обробки отриманих даних та відображення отриманих результатів для системи точного землеробства.

За результатами аналізу був розроблений новий електромеханічний прилад для вимірювання твердості ґрунту на глибину до 80 см, який відрізняється габаритними і ваговими параметрами, прийнятними для практичного використання.

Заявлений пристрій складається з корпусу, в якому закріплені дві зубчасті рейки 6 довжиною 1 метр (рис. 3.6), рухомої каретки 3, на якій закріплені шестерні 2, реверсивного двигуна 11 з редуктором 10 і датчика тензодатчика 9. До тензодатчика приєднаний шток з плунжером 5. У верхній частині корпус і зубчасті рейки з'єднані пластиною 1, на якій закріплений

електронний блок, а внизу – опорними майданчиками з кронштейнами 8. На корпусі твердоміра встановлені датчики верхнього 4-го і нижнього 7-го положення каретки.

Процес вимірювання твердості ґрунту відбувається наступним чином:

- опорні майданчики переводять в горизонтальні положення, а твердомір ставлять в точку, де необхідно провести вимірювання;
- включається електронний блок;
- після закінчення режиму ініціалізації та натискання кнопки Пуск на реверсивний двигун з редуктором подається напруга живлення 12 В;
- обертання від валу КПП передається на шестерню, і каретка з реверсивним двигуном, КПП, датчиком тензодатчика і закріпленою на ній штоком плунжера починає переміщатися вниз по зубчастих рейках.

Коли датчик каретки досягає нижнього положення, рух каретки припиняється, дані, отримані в ході експерименту, зберігаються в енергонезалежній пам'яті, і каретка повертається у вихідне положення.

У запропонованій конструкції пристрою за рахунок використання двох нерухомих зубчастих рейок і двох шестерень, закріплених на рухомій каретці, які приводяться в рух реверсивним мотор-редуктором, вдалося зменшити габарити пристрою ($\approx 1,2$ м), при цьому глибина вимірювання твердості ґрунту збільшилася до 80 см.

- електромеханічний привід;
- постійна швидкість занурення плунжера;
- Зберігання в енергонезалежній пам'яті даних про твердість ґрунту по всій глибині занурення плунжера і координат експерименту.

3.5 Розроблення рекомендацій щодо інтелектуального вибору способів оброблення ґрунту, що має опір проникнення не допустимий для ведення рослинництва

Інтелектуальний підхід до обробки ущільненого ґрунту базується на поєднанні механічних, органічних та технологічних методів, що дозволяють мінімізувати енергозатрати та покращити врожайність.

Перший етап: оцінка стану ґрунту

Перед вибором способу обробки необхідно провести комплексну діагностику:

- Механічний склад (вміст піску, глини, мулистих часток).
- Щільність та твердість (визначення опору проникненню коренів).
- Вологість (ступінь зволоження, рівень капілярного підйому води).
- Хімічний склад (рівень органічної речовини, кислотність).

Другий етап: вибір способів оброблення ґрунту

Для ґрунтів з високим опором проникненню ефективні такі методи:

Механічне розпушення:

- Глибоке рихлення (чизелювання) – застосовується для ущільнених шарів, виконується на глибину 35–50 см.
- Дискування – ефективне для поверхневого розпушення, дозволяє покращити аерацію та проникнення вологи.
- Фрезерування – застосовується на важких ґрунтах для рівномірного перемішування верхнього шару.

Органічні методи покращення структури ґрунту:

- Внесення органічної маси (сидерати, компост, перегній) для покращення пористості.
- Мульчування (солома, деревна тріска, торф) для збереження вологи та пом'якшення структури.
- Вирощування сидератів (люпин, гірчиця, фацелія), які розрихлюють ґрунт своїми кореневими системами.

Використання біологічних методів

- Мікробіологічні препарати (бактерії, які руйнують ущільнення та покращують структуру ґрунту).
- Вапнування або гіпсування – якщо ґрунт має підвищену кислотність або глинисту структуру.

Застосування мінімального обробітку

- No-Till (нульовий обробіток) – для уникнення повторного ущільнення.
- Strip-Till (смуговий обробіток) – рихлення тільки в рядках висіву культур.

Третій етап: вибір оптимального підходу за допомогою інтелектуальних технологій

- Дистанційний моніторинг ґрунту (GPS, супутникові знімки, дрони) для аналізу щільності та вологості.
- Використання датчиків твердості ґрунту для автоматизованої адаптації обробки.
- Агрномічні моделі прогнозування для вибору найкращого способу обробки в конкретних умовах.

Таким чином, використання інтелектуального методу для вибору способів оброблення ущільненого ґрунту необхідно:

1) впровадити систему моніторингу ґрунту, зокрема:

- використання датчиків для вимірювання щільності, вологості, температури та твердості ґрунту.
- збір і аналіз даних у реальному часі для визначення ділянок з надмірним опором проникненню.

2) застосування геоінформаційних технологій (ГІС), зокрема:

- створення цифрової карти полів із зоною ущільнення для локалізації проблемних ділянок;
- аналіз історичних даних для виявлення тенденцій ущільнення;

3) інтелектуальна обробка даних (Big Data та AI), зокрема:

- використання алгоритмів машинного навчання для прогнозування необхідного способу обробки ґрунту.
- розробка рекомендацій на основі аналізу агрономічних показників та метеоданих.

4) диференційований підхід до обробітку, зокрема:

- використання технології Variable Rate Technology (VRT) для регулювання глибини та інтенсивності обробки відповідно до характеристик ґрунту;
- локальне внесення розпушуючих матеріалів (гіпс, органіка) у зонах підвищеного ущільнення.

5) автоматизація сільськогосподарської техніки, зокрема:

- використання розумних плугів та чизелів з автоматичним налаштуванням глибини залежно від щільності ґрунту;
- впровадження автономних систем для точного виконання завдань.

6) інтеграція біологічних методів, зокрема:

- застосування мікробіологічних препаратів для природного розпушення ущільненого ґрунту;
- використання сидератів з потужною кореневою системою для поліпшення структури ґрунту.

Таким чином, основні варіанти механічного оброблення твердого ґрунту представлено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Основні варіанти механічного оброблення твердого ґрунту

П.п.	Опір проникненню (МПа)	Ступінь ущільнення ґрунту	Вид механічного оброблення твердого ґрунту	Основні види техніки
1	<1,25	Середнє ущільнення	Глибоке безвідвальне рихлення (глибокородпушувачами)	1. Чизельні плуги (чизелі) – оснащені стійками з долотоподібними робочими органами,

П.п.	Опір проникненню (МПа)	Ступінь ущільнення ґрунту	Вид механічного оброблення твердого ґрунту	Основні види техніки
				<p>розпушують ґрунт на глибину до 40 см.</p> <p>2. Глибокородзпушувачі долотоподібного типу – застосовуються на ущільнених ґрунтах, забезпечують аерацію та водонепроникність.</p> <p>3. Комбіновані агрегати (чизель-культиватори, чизель-плоскорізи) – поєднують рихлення з додатковою обробкою верхнього шару.</p>
2	1,25–2,0	Щільне	Оранка з передплужниками	<p>1. Навісні плуги – для тракторів середньої потужності (наприклад, ПЛН-3-35, ПЛН-5-35).</p> <p>2. Напівнавісні плуги – для важких умов і потужних тракторів (наприклад, Kverneland EG, Lemken EuroTitan).</p> <p>3. Причіпні плуги – для великих площ (наприклад, Gregoire Besson RWY, Kuhn Challenger).</p>
3	2–3	Дуже щільний	Боронування (важкими боронами)	<p>1. Зубові важкі борони – мають міцні металеві зуби, розпушують ґрунт на глибину до 10–12 см (БЗТС-1,0, БЗТ-7).</p> <p>2. Дискові борони – оснащені увігнутими дисками, які подрібнюють великі грудки та працюють на глибину 10–20 см (БДТ-3, БДВП-4,2, Lemken Rubin 10).</p> <p>3. Ротаційні борони – мають обертові робочі</p>

П.п.	Опір проникненню (МПа)	Ступінь ущільнення ґрунту	Вид механічного оброблення твердого ґрунту	Основні види техніки
				органи, ефективні для важких сухих ґрунтів (DMI Turbo Till, Great Plains Turbo-Max).
4	>3	Надзвичайно щільний	Долотові розпушувачі	<p>1. Глибокорозпушувачі долотоподібного типу – працюють на глибину 40–60 см, руйнують ущільнені горизонти (ПЧ-2.5, ГР-3.4, Ripper-5, Kverneland Flatliner).</p> <p>2. Чизельні розпушувачі з долотоподібними стійками – поєднують чизельну та долотоподібну обробку для кращої аерації та водопроникності (Horsch Terrano, Agrisem Cultiplow).</p> <p>3. Комбіновані агрегати (долотоподібний розпушувач + котки) – для додаткового вирівнювання поверхні після розпушування (Quivogne SDR, Kuhn Deep Tillage).</p>

3.6 Висновок

За результатами проведеного дослідження встановлено, що традиційний термін «твердість ґрунту» вже не використовують в нормативних документах та законодавчих актах. Наразі використовується термін «опір проникненню», який є більш фізично суворим, оскільки твердість – опору матеріалу до вдавнення або подряпин не є фізичною константою, а є складною властивістю,

яка залежить як від міцності та пластичності матеріалу, так і від методу вимірювання.

Встановлено, що під час проведення вимірювань опору проникнення ґрунту на сильно ущільненому або висохлому ґрунті на рукоятку приладу прикладаються великі зусилля для закопування кінчика. Це призводить до збільшення навантаження на кручення, які послаблюють точки кріплення напрямних штанг з верхньою опорною плитою і підставою.

Запропоновано конструкцію пристрою за рахунок використання двох нерухомих зубчастих рейок і двох шестерень, закріплених на рухомій каретці, які приводяться в рух реверсивним мотор-редуктором, що дає можливість зменшити габарити пристрою ($\approx 1,2$ м), при цьому глибина вимірювання твердості ґрунту збільшилася до 80 см.

Це дозволяє використовувати прилад для визначення опору проникнення ґрунту після проходження процедур розмінування ґрунту, який зазнав впливу бойових дій за допомогою спеціальної важкої техніки.

Використання інтелектуальних методів для вибору способів оброблення ущільненого ґрунту дозволить оптимізувати витрати, підвищити ефективність обробки та покращити агрофізичні властивості ущільненого ґрунту.

ВИСНОВКИ

Слід зазначити, що, незважаючи на значну кількість наукових публікацій, дані про оптимізацію показників ущільнення ґрунтів знаходяться на стадії накопичення, а рекомендації деяких наукових установ і пропозиції окремих фахівців в більшості випадків є попередніми і локальними.

Об'ємна маса підповерхневого шару не є достатньо об'єктивним показником для прийняття рішення про доцільність глибокого розпушування. У зв'язку з цим заслуговують на увагу пропозиції Консультативної служби з питань сільського господарства Великобританії, Науково-дослідного центру родючості ґрунтів в Мюнхеберзі, Сіднейського університету та інших щодо оцінки стану ущільнення підповерхневого шару за кількістю проникаючих в нього живих коренів. Слабке проникнення коренів свідчить про необхідність розпушення підповерхневого шару, як правило, в комплексі з іншими агротехнічними заходами (застосуванням добрив, хімічних меліорантів, моліозуванням та ін.).

Аналіз експериментальних даних розділу 1 показує, що оптимальна загальна пористість для росту рослин варіює від регіону до регіону і зазвичай набагато вище в районах з більш вологим кліматом. Наприклад, для дерново-підзолистих ґрунтів рекомендована сумарна пористість орного шару знаходиться в межах 55–62 %. Для ґрунтів з мінімальним зволоженням цей показник може становити 50–55 %. Більш висока пористість при достатньому і надмірному забезпеченні вологою потрібна для забезпечення аерації, коли основна частина пір насичена вологою.

Залежність опору проникненню від властивостей ґрунту вказує на його важливість для оцінки ґрунтів. Саме тому його вимірювання є одним з обов'язкових при агрофізичних дослідженнях ґрунтового покриву. Однак завжди необхідно враховувати стан вологи в ґрунті, її вологість, а також метод (прилад), за допомогою якого вимірюється ця важлива характеристика,

починають помітно страждати від підвищеної стійкості до проникнення коренів, значенням прийнято вважати близько 3 МПа ($\approx 30 \text{ кг/см}^2$).

Розроблено конструкцію пристрою, що використовує дві нерухомі зубчасті рейки та дві шестерні, закріплені на рухомій каретці, які приводяться в дію реверсивним мотор-редуктором. Це дозволило зменшити габарити пристрою ($\approx 1,2 \text{ м}$) та збільшити глибину вимірювання твердості ґрунту до 80 см.

Такий прилад придатний для визначення опору проникненню ґрунту після розмінування територій, що зазнали впливу бойових дій із застосуванням спеціальної важкої техніки.

Використання інтелектуальних методів під час вибору способів обробки ущільненого ґрунту сприяє оптимізації витрат, підвищенню ефективності оброблення та покращенню агрофізичних властивостей ґрунту.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

- 1 Schmitt P., Erbland P., Peterson M.L. Effects of natural and synthetic fibers in turfgrass horse racing surfaces as characterized by triaxial shear tests (2025) *Sports Engineering*, 28 (1), art. no. 7
DOI: 10.1007/s12283-025-00491-x
- 2 Eisenberg, J. Off to the Races. *The Smithsonian Magazine*, 1 August 2004. Available online: <https://www.smithsonianmag.com/history/off-to-the-races-2266179/>(accessed on 1 November 2023).
- 3 Wang, J.; Cao, A.; Song, D.; Feng, B.; Li, H.; Long, Y.; Ye, Z. Laboratory Experiments and Numerical Simulation on Dynamic Response of Island Reclamation Coral Sand under Aircraft Load. *Materials* 2023, 16, 3465. <https://doi.org/10.3390/ma16093465>
- 4 Wu, Q.; Ding, X.; Zhang, Y. Microfabric evolution of coral sand foundations during seismic liquefaction using 3D images. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 2022, 162, 107445.
- 5 ГО «Центр екологічних ініціатив «Екодія». Чи можна вилікувати ґрунт від війни — відповіді на найпоширеніші запитання. Сайт: Kurkul.com онлайн-асистент фермера. URL: https://kurkul.com/spetsproekty/1423-chi-mojna-vilikuvati-grunt-vid-viyni--vidpovid-na-nayposhirenishi-zapitannya?utm_source=chatgpt.com (14 березня 2023).
- 6 (2019) *F3400-19: Standard test method for in-situ testing of functional properties of equine surfaces: Artificial surfaces*. Conshohocken, PA: ASTM International <https://doi.org/10.1520/F3400-19>
- 7 Гроші, люди, час — яка ціна розмінування України. Сайт: Kurkul.com онлайн-асистент фермера. URL: https://kurkul.com/spetsproekty/1655-groshi-lyudi-chas--yaka-tsina-rozminuvannya-ukrayini?utm_source=chatgpt.com (24 жовтня 2024).

- 8 Марія Бабенко. Як очистити сільгоспземлю від мін і забруднення, скільки це коштує і хто за все заплатить. Сайт: Економіка України. URL: https://thepage.ua/ua/economy/zabrudnennya-gruntiv-i-rozminuvannya-silgospzemli-v-ukrayini-pid-chas-vijni?utm_source=chatgpt.com (23 листопада 2023).
- 9 Агросектор України після трьох років війни: втрати і виклики. URL: https://superagronom.com/articles/771-agrosektor-ukrayini-pislya-troh-rokiv-viyni-vtrati-i-vikliki?utm_source=chatgpt.com (24 лютого 2025).
- 10 Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу / О. Голубцов, Л. Сорокіна, А. Сплодитель, С. Чумаченко – Київ: ГО “Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2023. – 32 с. https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii-summary1.pdf?utm_source=chatgpt.com
- 11 Soil and water//Crops and Soils Magazine. 1984. V. 36. N 6. P. 21–23.
- 12 Kushwaha H. S. Trip a (hi R. P. Management of soil and water in dry land agriculture//Indian Farmer’s Digest. 1984—1985. V. 17—18. N 12, 1. P. 9–12.
- 13 Ruddnogle J. How root restriction can crimp your yields// Farm Journal, 1985. V. 109. N 7. P. 20–21.
- 14 Marking S. Soil compaction presses profits // Soybean Digest. 1984. V 44. N 9. P. 8–10.
- 15 Бондарев А. Г. Проблема обостряється // Земледелие. 1985, № 2. С. 23–25.
- 16 Dwyer M. Tyres: The most important factor // Power Farming. 1982. V. 61. N 7. P. 16–23.
- 17 Mehuys G R. Kirby P C Implications on the seasonal variability of soil erosion on crop production//Canadian Agricultural outlook Conference / Agricultural Resources for the Future. Ottawa. 10 December 1985 20 p.

- 18 Fullen M. A. Compaction, hydrological processes and soil erosion on loamy sand in east Shropshire, England // Soil and Tillage Research. .1985. V. 6. N 1. P. 17–29.
- 19 Dickey E. C, Peterson T. R., Eisenhauer D. E. Soil compaction: Where, how bad, a provlem//Crops and Soils. 1985. V. 37. N 9. P. 12–14.
- 20 New achievments in technologies of cultivation and harvesting of crops ensuring the preservation of natural soil fertility//FAO/ECE/ AGRi/WP. 2. October. 1985, Geneva. N 109. 49 p.
- 21 Techniques et on till ages modernes de preparation des sols// FAO/ECF./AGRI/VVP.2. 1984. N 60. 26 p.
- 22 Liska E., Kovac K. Ncpria/ nivu vplyv kolies strjov na vlastosti pody // Oroda, 1981. V. 29. N I. P. 27–29.
- 23 Лиепиньш К. В. Рыхление и оструктурпвание подпахотных слоев почвы с применением химмелиорантов // Проблемы снижения уплотняющего воздействия на почву ходовых систем трактора, мобильной сельскохозяйственной техники и рабочих органов почвообрабатывающих машин. Киев, 1982. С: 144–146.
- 24 Marking S. The paraplowc A performance Profile // Soybean Digest. 1986. V. 46. N 4. P. 8–10.
- 25 Stengel P., Douglas J., Guerif J. Factor influencing the variation of some properties of soils in relation to their suitability for direct drilling//Soil and Tillage Research. 1984. V. 4. \ 1. P. 35–53.
- 26 Saini G. R, Chow T. L., Ghanem J. Compatibility indexes of some agricultural soils of New Brunswick ? / Soil Science. 1984. V. 137. P. 33–38.
- 27 Borchert H., Mederer J. Ober die Moglichkeit einer Voraus – sage des Lockerungsfolges bei tiefgelockerten Boden // Zeilschrift fiir Kul- turtechnik und Flurbereinigung. – 1985. Bd 26. N 5. S. 282–294.

- 28 Рабочев И.С., Королева И. Е. Важнейшие показатели оптимального уровня почвенного плодородия // Плодородие почв: Проблемы, исследования, модели. Тр. Почвенного института им. В. В. Докучаева. Москва. – 1985, С. 29–37.
- 29 Пуповин А. И. Обработка почвы в интенсивном земледелии Нечерноземной зоны. М.: Колос, – 1984. – 184 с.
- 30 Уигурян В.Г. Проблемы расширенного воспроизводства почвы и плодородия в интенсивно используемых черноземах // Седьмой ташкентский съезд ВОП. Ташкент, – 1985. Ч. 6 С. 151–158.
- 31 Медведев В. В. Воспроизводство агрофизических параметров плодородия черноземов // Седьмой делегатский съезд ВОП. Ташкент, – 1985. Ч. 6. – С. 135–150.
- 32 Рекомендации по ускоренному окультуриванию тяжелых почв. Минск: БелНИИМнВХ. – 1985. – 24 с.
- 33 Kuipers A. The challenge of soil cultivations and soil water problems // Journal of Agricultural Engineering Research. – 1984. – V. 29. – N 3. – P. 177–190.
- 34 Лаукарт Ф. Ф. Сложение почвы при минимальной обработке // Земледелие. 1985, № 3. С. 34–35.
- 35 Mafdl F. X., Fischbeck G Wenn dem Boden die Luft ausgeht // DLG Mitteilungen. 1985. Bd 100. N 23. S. 1354–1356.
- 36 Zrubec F. Uprava fyzikalnych vlastnosti pody pre pestovanie cukrovej repy // Uroda. 1985. V. 33. N 1. P. 502–504.
- 37 Герасимов И. П., Тюрин И. В. "Грунтознавство". - М.: Наука, 1979.
- 38 Лопатін В. М. "Основи ґрунтознавства". - К.: Вища школа, 2003.
- 39 Крупський І. І., Журавель П. С. "Екологія ґрунтів". - Львів: Світ, 2011.
- 40 Гончарук В. В. "Механічні властивості ґрунтів" – К.: Наукова думка, 2020.
- 41 Lhotský J., a kol.: Metodika zърodnmнn zhutnmнэch pud. ЪVTIZ Praha, 1984.

- 42 Zrubec F. Metodika zъrodnenia zhutnenєch рfd. SFRI, Bratislava. 1998.
- 43 Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А. 1986. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М.: Агропромиздат
- 44 Керівництво для польової практики з фізики ґрунту, 1988
- 45 СНиП 3.06.03-85. Автомобильные дороги/Госстрой СССР.–М.:Госстрой СССР, 1986.–108 с. (не чинний в Україні, інформаційне джерело).