

РОЗДІЛ 3

ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ І ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ЩОДО ЗБЕРЕЖЕННЯ, ВІДНОВЛЕННЯ ТА РАЦІОНАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ ПРИРОДНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ

3.1. Ультразвуковий моніторинг щільності ґрунту

Антипчук Б.О.

*Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації
сільського господарства» НААН України*

Агротехнічні заходи основного обробітку ґрунту з економічної точки зору є найбільш енергоємними серед всього комплексу технологічних операцій вирощування та збирання сільськогосподарських культур. Від якості і ефективності обробітку ґрунту залежить ріст і розвиток рослин або ж повна чи часткова руйнація агрегатів ґрунту, що призводить до його переущільнення, а як результат – зниження родючості.

Саме від щільності залежать усі ґрунтові режими: повітрообмін, водопроникність, вологоємність, теплоємність, мікробіологічний та окисно-відновний процеси, розвиток кореневої системи рослин.

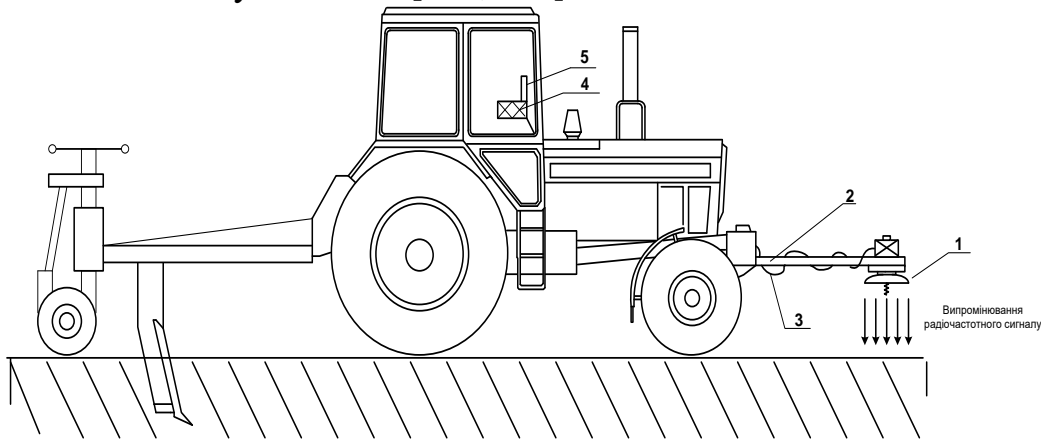
Цілеспрямоване керування якістю виконання технологічних операцій (насамперед – розущільнення ґрунту) сприяє підвищенню ефективності рослинництва та збільшенню врожайності сільськогосподарських культур.

Найбільш оптимальним на даний час для вирішення проблеми ефективного розущільнення ґрунту є застосування пристроїв, які базуються на взаємодії ультразвукових коливань з ґрунтом.

Розробка автоматизованої системи виявлення глибини залягання ущільненого шару ґрунту (плужної підшви) (рис. 1), яка спроектована на основі ультразвукового методу, дозволить вирішити два надзвичайно важливих для аграрного виробника питання: збільшення врожайності сільськогосподарських культур та економія палива.

Застосування автоматизованої системи ґрунторозпушення з основним елементом – експериментальним радіофізичним пристроєм, дія якого базується на методі ультразвукового випромінювання, дозволяє досить оперативно виявити ущільнені ділянки поля, що обробляється. Уникати поверхневого розпушення ґрунту, а як результат – покращення живлення кореневої системи і підвищення врожайності, а також мінімізація негативного впливу техніки на структуру родючих прошарків ґрунту. Принцип роботи даної автоматизованої системи вже

описаний в деяких публікаціях [215, 216].



1 – ультразвуковий датчик-випромінювач; 2 – рама пристрою; 3 – система кабелів живлення та передачі інформації, які з'єднують ультразвуковий датчик-випромінювач з блоком формування, прийому та обробки сигналів; 4 – блок формування, прийому та обробки сигналів; 5 – блок індикації та керування

Рис. 1. Схема МТА з автоматизованою системою ґрунторозпушування

Джерело: авторська розробка

Поширення звукових коливань в будь-якому середовищі залежить від його властивостей. Як відомо в газах та в повітрі ультразвук поширюється з великим згасанням, саме тому рихлі ґрунти: піщані та супіщані, які мають великі повітряні фази, поглинають і розсіюють ультразвуковий сигнал, тобто через такі ґрунти звукова хвиля проходить і наражається на жорстку перепону, якщо така є (такою перепону може бути ущільнений шар ґрунту) та відбивається у зворотному напрямку, якщо ж такої перепони немає, тоді хвиля розсіюється і затухає.

Лабораторні дослідження, які були проведені на фізичній моделі різних типів ґрунту з ущільненими його прошарками на різній глибині, вказують на те, що пісок, глина та чорнозем мають різну ультразвукову пропускну здатність (рис. 2). Інша справа з щільними ґрунтами. Під час ущільнення ґрунту вміст у ньому повітряної фази та води зменшується за рахунок зростання твердої фази, а як відомо з теорії акустики, ультразвуковий сигнал добре відображається від твердих предметів (поверхонь).

Отже, в роботі даної автоматизованої системи прийнято до уваги основну фізичну властивість надущільненого шару ґрунту – це нездатність пропускати звук, і, як наслідок – провокується швидке відбиття звукової хвилі, про що свідчить час повернення хвилі з відповідним зображенням на дисплеї пристрою.

Інформативні параметри, які беруться до уваги при роботі основного елемента даної автоматизованої системи: ультразвукового

²¹⁵ Антипчук Б.О. Ультразвуковий експериментальний пристрій – основний елемент автоматизованої системи керування положенням ґрунторозпушувача [Текст] / Б.О. Антипчук // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб. – 2017. – Вип. 47, Ч. 1. – С. 47–51.

²¹⁶ Мироненко В.Г. Пристрій оперативного визначення глибини залягання плужної підшви в процесі її розущільнення [Текст] / В.Г. Мироненко, Б.О. Антипчук // Механізація та електрифікація сільського господарства. – Главаха : ІМЕСГ, 2017. – Вип. 5 (104). – С. 28–34.

пристрою – це акустичний опір ущільненого шару ґрунту, швидкість звукової хвилі та час її повернення до датчика.

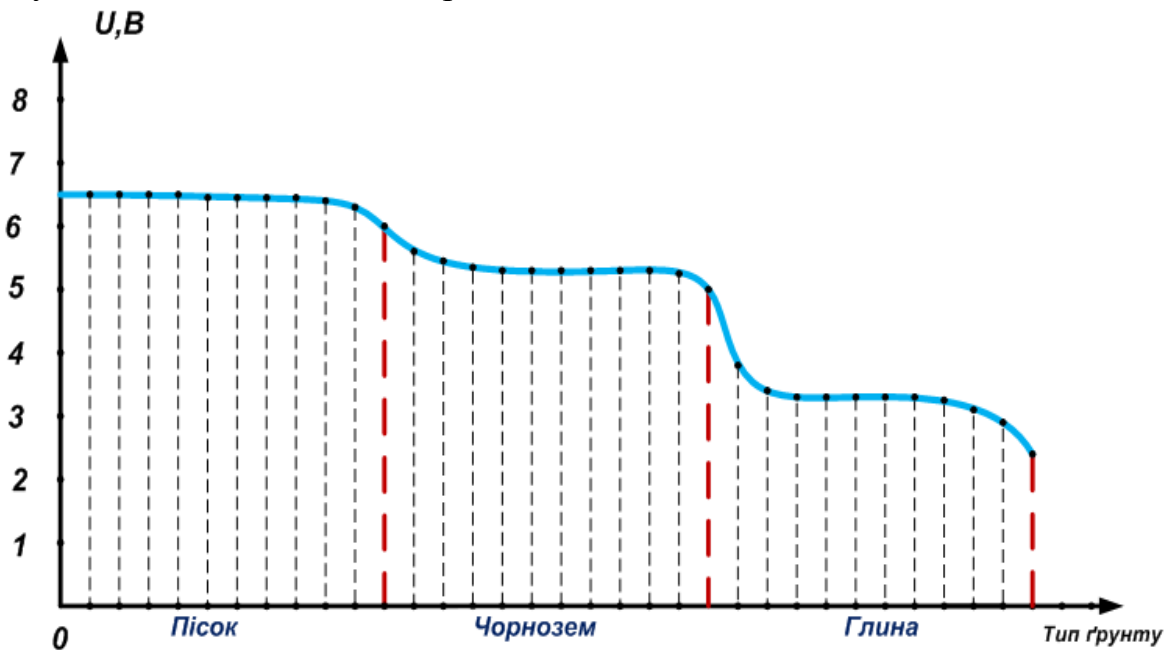


Рис. 2. Залежність сигналу датчика (U) від типу ґрунту

Джерело: авторська розробка

Саме на вимірі проміжку часу з моменту випромінювання ультразвукового імпульсу до моменту його прийому після відбиття від ущільненого шару ґрунту базується принцип роботи ультразвукового датчика – перетворювача визначення глибини залягання плужної підшви. Даний проміжок часу визначається за формулою:

$$t = \frac{2H}{c}, \quad (1)$$

де H – глибина залягання ущільненого шару ґрунту (м); c – швидкість розповсюдження звуку в ґрунті; t – час проходження звукового сигналу з моменту випромінювання до прийому після відбиття.

Беручи до уваги закони і основні положення акустики, розглянемо питання ефективності практичного застосування ультразвукового методу в роботі автоматизованої системи розущільнення ґрунту в процесі його обробки. Саме завдяки певним властивостям середовища можливе проходження в ньому звукової хвилі; чи мають такі властивості ґрунти?

Виявляється, що ультразвукові коливання з ґрунтом практично не досліджуються в ехолокації через неможливість застосування ультразвуку для підповерхневого зондування землі на велику глибину, проте ультразвук вже давно застосовують для хімічного та механічного аналізу ґрунтів. Також чимало є досліджень відносно швидкості звукової хвилі в ґрунтах з метою визначення їх міцності [217].

²¹⁷ Нерпин С.В. Физика почвы [Текст] / С.В. Нерпин, А.Ф. Чудновский. – М. : Наука, 1967. – С. 18–22, 77–86.

Враховуючи власні проведені дослідження та основні закони акустики можна стверджувати про наявність ефекту не проходження звуку крізь надущільнений шар ґрунту через його механічні та фізичні властивості. Саме з урахуванням такого ефекту та часового проміжку повернення хвилі, ультразвуковий метод безперечно можна використати в роботі даної автоматизованої системи, тим паче, що глибина сканування не є надто великою, так як плужна підшва залягає приблизно на глибині 25–50 см.

Хвиля, яка віддаляється по середовищу від місця виникнення з великою швидкістю, залежить виключно від властивостей самого середовища, а саме: чим більша пружність середовища, тим більші пружні збудження, які виникають в середовищі при деформації, тим більше збудження передається від частинки до частинки – тим більша швидкість звуку; чим більша щільність, тим повільніше частинки набирають швидкість під дією пружних збуджень – тим швидкість звуку менша. Отже, у всіх питаннях акустики потрібно враховувати як пружність і щільність, так і інерційні властивості середовища. Від інших властивостей середовища його акустична поведінка не залежить [218].

Властивість середовища проводити акустичну енергію, в тому числі і ультразвуку, характеризується акустичним (хвильовим) опором. Хвильовий опір (імпеданс) залежить від щільності середовища та швидкості розповсюдження пружної хвилі. Акустичний опір середовища визначається поглинанням, заломленням і відбиттям ультразвукових хвиль.

Для розрахунку імпедансу ґрунтів можна скористатись наступною формулою:

$$Z = \rho c, \quad (2)$$

де Z – хвильовий опір, кг/(м²с); ρ – щільність, кг/м³; c – швидкість звуку, м/с.

Або за іншою формулою:

$$Z = \sqrt{E\rho}, \quad (3)$$

де E – модуль пружності, Н/м²; ρ – щільність, кг/м³.

В свою чергу модуль пружності визначається із закону Гука як коефіцієнт співвідношення між напруженням навантаження σ на ґрунт і відповідною його деформацією ε :

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma. \quad (4)$$

Від модуля пружності залежить швидкість звуку в середовищі, яку можна визначати за формулою для пружного середовища: за модулем

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (5)$$

²¹⁸ Исакович М.А. Общая акустика [Текст] : учеб. пособие / М.А. Исакович. – М. : Наука, 1973. – С. 386–392.

Хоча пружність є загальною властивістю природних тіл, але ґрунти, як дисперсні утворення, можуть бути пружними лише за певних умов. Наприклад, при стисненні в піщаних ґрунтах пружні сили виникають, але при цьому піщинки розтягуються і відходять одна від одної, тобто в такому ґрунті рух звукової хвилі неможливий, тому що відсутня інерція піщинок, яка б передавалась від одного об'єму піску до іншого, тобто в такому середовищі хвиля затухає, якщо на її шляху немає жорсткої перепони. В надущільненому ж ґрунті спостерігається ефект опору твердих частинок деформаційним процесам, і чим щільніший ґрунт, тим цей опір є сильнішим, тим швидше відбивається хвиля.

Ґрунт є шаруватим середовищем, і його ущільнений пласт залягає, як вказувалось раніше, на глибині 25–50 см, тобто є нижнім шаром. При падінні звукової хвилі на межу розділу шарів ґрунту частина енергії буде відбиватися в першому шарі, а інша буде проходити в інший. Співвідношення між відбитою енергією та енергією, що проходить в інший шар, визначається хвильовим опором першого і другого шару:

$$Z' = \frac{\rho'c'}{\rho c} . \quad (6)$$

Відношення Z' називається відносним хвильовим опором; ρ – щільність (кг/м^3) та c – швидкість звуку (м/с) хвилі, що проходить в інший шар ґрунту; ρ' – щільність (кг/м^3) та c' – швидкість звуку (м/с) відбитої хвилі.

Коефіцієнт пропускання енергії $\tau_{\text{проп}}$ із одного шару ґрунту в інший визначається відношенням інтенсивності хвилі, що проходить в другий шар, до інтенсивності падаючої хвилі:

$$\tau_{\text{проп}} = \frac{4z_1z_2}{(z_1 + z_2)^2} . \quad (7)$$

Плужна підшва, яка являє собою збитий, без повітряних фаз і рідини пласт, і є абсолютно жорстким середовищем, на яке наражається хвиля, що проходить з верхнього шару, і миттєво відбивається. Проте енергетичні втрати та швидкість падаючої хвилі та хвилі, що повертається до датчика, залежать виключно від типу ґрунту та його пропускну здатності (рис. 2).

В акустиці більш жорстким середовищем називають середовище, яке менше піддається стисканню. Поведінка таких середовищ близька до поведінки абсолютно жорсткого тіла, проте здатність стискатись ще не дає точної відповіді на те, як поведе себе середовище по відношенню до падаючої хвилі: буде пропускати хвилю чи стане жорсткою перепорою. В акустиці слід порівнювати лише хвильовий опір середовищ, тобто відношення щільності до здатності стискатись. Жорсткішим буде той пласт, для якого це відношення більше.

Більшість ґрунтів, як відомо, мають щільність від 1000 до 1500 кг/м³. Швидкість розповсюдження звуку в ґрунтах змінюється від 85 до 180 м/с [219]. Це все показники для ґрунтів у природному стані. Ущільнений шар ґрунту, який утворюється внаслідок господарської діяльності людини, має значно більшу щільність і через свої механічні та фізичні властивості чинить досить суттєвий хвильовий опір.

Ґрунт, особливо в польових, а не в лабораторних умовах – середовище з неоднорідною поверхнею: рослинний покрив, нерівності, також присутність повітряних ям. Все це спричинює ефект дифракції – розсіювання звукових пучків при віддаленні від випромінювача та спотворення сигналу. Наприклад, при розповсюдженні звуку над травою його рівень може додатково зменшитись на 5–6 дБ. Проте компенсацію таких спотворень можна здійснити за допомогою певного математичного алгоритму.

На проходження звукової хвилі сильно впливає повітря та вітер. Якщо звукова хвиля рухається за напрямком вітру, то її швидкість збільшується (відбувається концентрація звукової енергії), а якщо проти – то зменшується, тобто спостерігається у цьому випадку явище «звукової тіні».

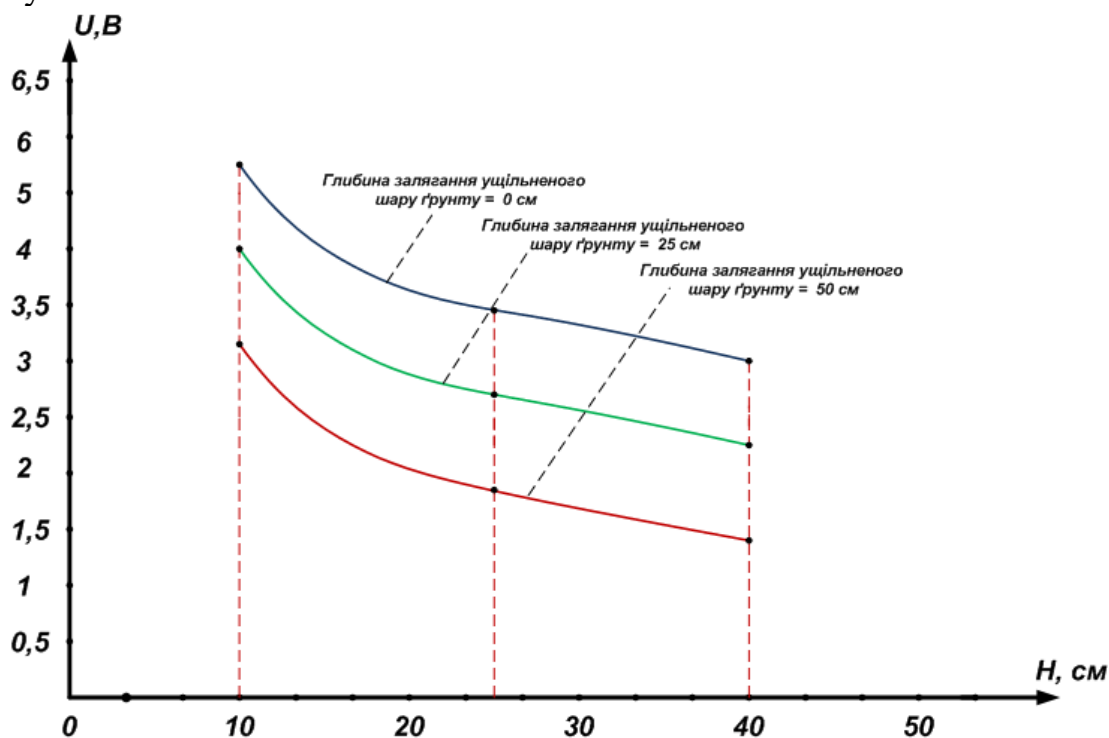


Рис. 3. Залежність сигналу датчика (U) від висоти встановлення над поверхнею ґрунту

Джерело: авторська розробка

Отже, величина затухання залежить від стану поверхні ґрунту так від висоти розміщення датчика над поверхнею землі, тому для уникнення спотворення прийнятого сигналу слід забезпечити безповітряний контакт

²¹⁹ Нецветов М.В. Скорость звука и модуль упругости почвы: измерение и роль в передаче вибраций дерева на почву [Текст] / М.В. Нецветов // Ґрунтознавство. – Донецьк : Донецьк. ботан. сад, 2010. – Т. 11. – С. 48–52.

датчика з ґрунтом, тобто максимально зменшити відстань від датчика до ґрунту. Проведені лабораторні дослідження показали, що чим вище над поверхнею ґрунту розміщено ультразвуковий датчик, тим гірший сигнал, що реєструється (рис. 3), тобто збільшується похибка вимірювання (для глибини залягання ущільненого шару ґрунту 25 см похибка становила від 4 % до 14 %). Найбільш точні вимірювання були досягнуті при установці датчика на висоті 20 см (похибка становила 4–6 %), а із збільшенням висоти установки похибка збільшувалась.

Технічне забезпечення ефективного розуцільнення плужної підшви в сучасних технологіях обробки ґрунту потребує застосування сучасних, більш ефективних методів, які дозволили б оперативно проводити моніторинг щільності ґрунту всього поля, яке обробляється, під час безперервного руху машинно-тракторного агрегату. Звичайно, щільноміри ґрунту вже давно застосовуються, проте вони мало ефективні, тому що можуть застосовуватись лише місцево, тобто на зовсім невеликій ділянці поля, а оббігати все поле із щільноміром у руках просто неможливо, тому і виникає необхідність пошуку більш прогресивних методів виявлення плужної підшви.

Що стосується ущільненого ґрунту, то застосування ультразвукового методу для його виявлення є цілком можливим, про що свідчать проведені лабораторні та польові дослідження, а розроблений ультразвуковий пристрій забезпечить ефективне визначення глибини залягання ущільненого прошарку ґрунту в сучасних технологіях рослинництва.