

**СУЧАСНІ ВИМІРЮВАЧІ ЩІЛЬНОСТІ ҐРУНТУ: ЇХ ОГЛЯД ТА ДОСЛІДЖЕННЯ  
ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКУ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ВИЗНАЧЕННЯ  
ПЕРЕУЩІЛНЕНОЇ ДІЛЯНКИ ПОЛЯ, ЯКЕ ОБРОБЛЯЄТЬСЯ**

**Антипчук Богдан Олександрович**

викладач спеціальних дисциплін першої категорії,  
здобувач вищої освіти ступеня доктора філософії  
Житомирський агротехнічний фаховий коледж, м. Житомир, Україна  
ORCID: 0000-0002-1426-4782  
bogdanantypchuk@ukr.net

*Зміни, які відбуваються в агропромисловому комплексі потребують розробки та створення нових знарядь і машин, та вдосконалення наявних. Це, в свою чергу, можливо лише при розгляданні обробітку ґрунту як доповнення до природних процесів утворення самого ґрунту із врахуванням біологічних, фізичних та механічних властивостей, а також зменшенням енергетичних затрат на його обробіток, через те, що агротехнічні заходи основного обробітку ґрунту з економічної точки зору є найбільш енергоощадними серед всього комплексу технологічних операцій вирощування та збирання сільськогосподарських культур. Тому проблема створення енергоощадних технологій та технічних засобів обробітку ґрунту, які сприяють цьому збереженню – це ні що інше, як проблема екологічного та енергетичного значення, яка не може бути вирішена простим зменшенням глибини обробітку ґрунту.*

*Таким чином, для розв'язання цих питань необхідно застосовувати більш прогресивні методи обробітку, зокрема, розущільнення ґрунту. Важливим є технічне забезпечення цієї технологічної операції в сучасній галузі рослинництва, щоб понести найменші енергетичні затрати та підвищити врожайність сільськогосподарських культур.*

*У статті наведено аналіз наявних сучасних приладів для вимірювання щільності ґрунту в режимі безперервної реєстрації: пенетраторів, пенетрометрів, цифрових твердомірів, GPS-пенетрометрів, а також розглядається питання застосування ультразвуку для виявлення ущільнених ділянок поля, яке обробляється. Розглядається акустична поведінка плужної підшви, її основні акустичні константи.*

*Описано основні результати проведеного дослідження на базі розробленої моделі оперативної системи визначення глибини залягання ущільненого шару ґрунту із застосування радіофізичного методу дослідження механічних і фізичних властивостей ґрунту, які базуються на ультразвуковому випромінюванні, методу безперервного радіохвильового профілювання в русі, тобто сканування ґрунту відбувається під час руху машинно-тракторного агрегату в момент обробітку поля, методу синтезу технічних засобів, теорії автоматичного управління із застосуванням ультразвукового пристрою визначення глибини залягання плужної підшви (ПВГП).*

*Проведено аналіз одержаних результатів із застосуванням датчика з одним та двома каналами приймально-передавального тракту. Досліджується оптимальна висота встановлення датчика над поверхнею ґрунту.*

**Ключові слова:** пенетратор, пенетрометр, ґрунторозпушувач, твердомір, ультразвук, радіофізичний пристрій, датчик, плужна підшва, приймально-передавальний пристрій випромінювання, акустична провідність.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.4.1>

**Вступ.** Більшість сучасних приладів дають змогу вести вимірювання в режимі безперервної реєстрації одночасно з обробленням ґрунту: вимірювати вологість, твердість та інші показники, акумулювати результати, статистично і графічно їх обробляти. Такі твердоміри (Gogolinskiy et al., 2019; Vashko et al., 2019) є американського, голландського та словацького виробництва. Розробки таких твердомірів проводяться і в Україні. Наприклад, твердомір М. М. Сурду (Surdu et al., 2002): шуканий результат отримують зі співвідношення тиску пуансона при його зануренні в ґрунт й величини залишкової деформації. Тензометричний датчик кріпиться до лапи культиватора і вимірювання твердості здійснюються під час виконання обробки ґрунту. Змінюючи форму пуансона, можна оцінити опір ґрунту різним видам деформації і використовувати отримані дані не тільки при виборі інтенсивності й глибини обробки, а й в конструюванні ґрунтообробних робочих органів.

Подібний твердомір був розроблений і випробуваний у Швеції. Конусоподібні пенетратори (Ahrens et al., 2021; Ebato, 2020; Saye et al., 2020; Vakili et al., 2021) з кутом атаки в 30 ° і діаметром 6,3 см були укріплені на лапах глибокорозпушувача і давали змогу проводити вимірювання твердості на глибинах 10, 30 і 50 см. Пенетратор був з'єднаний з сенсором фірми Bosch, здатним вимірювати зусилля в широкому інтервалі значень. При швидкості обробки ґрунту 1,5 м / с твердомір фіксував вимірювання кожної секунди з одночасним позиціонуванням (за допомогою Trimble SweeEight).

Мобільні пенетрометри (Ahmed, 2020) – пристрої, що укріплюються на колесах мобільного засобу, на трейлерах або вантажівках. Їх доставляють на досліджувану ділянку разом з моторами, електробатареями або іншими джерелами енергії. Додавання лишньої ваги для мобільного пристрою вантажівки збільшує потенційний максимум сили занурення, а довжина проникаючого

удару може бути збільшена без обмеження потрібної ваги в порівнянні з іншими типами пенетрометрів. Ці пристрої оснащені мультипенетрометрами (Hashem & Nikudel, 2016; Herric & Jones, 2002; Latvala et al., 2020; Thiel et al., 2020) для одночасного дослідження декількох ділянок, щоб отримати дані про тривимірну просторову характеристику твердості ґрунту для побудови відповідної карти. З огляду та аналізу літератури відомо, що такі основні фізико – механічні властивості ґрунту як твердість, щільність, вологість і інші змінюються через кожні 5-10 м по ходу руху сільськогосподарських агрегатів. Визначення показників традиційними твердомірами, що характеризують стан ґрунту, проводиться лише в певних точках поля, попередньо розбитого на сектори, ділянки тощо, при цьому, кількість точок, в яких проводяться вимірювання, обмежується складністю, трудомісткістю і тривалістю проведення цих вимірювань. Тобто, стає зрозуміло, що картина, яка показує розподіл даних властивостей ґрунту по площі поля, при описаному методі вимірювання, не відповідає дійсності. Звичайно, більш досконаліми є твердоміри на тензодатчиках, проте їх застосування вимагає дуже малої швидкості обробки поля.

В останні роки в Україні для виявлення ущільнених ділянок поля застосовуються цифрові технології (Rezaeva, 2017; Wijewardane et al., 2020), зокрема: GPS-пенетрометри (Lee & Byun, 2020; *First results...*, 2019), які за допомогою певних, встановлених на смартфон програм, відображають місце замірів та місцезнаходження того, хто робить заміри.

Чинні наразі методи й технічні засоби для визначення твердості ґрунту, або не дають змоги ефективно застосовувати технології координатного землеробства, тому що вимагають високих затрат ручної праці і часу на виконання масових вимірювань, або мають низьку достовірність результатів.

Отже, можна зробити висновок, що актуальним завданням сучасної науки є вдосконалення методів і технічних засобів, які дадуть змогу забезпечити безперервне пошарове масове вимірювання твердості ґрунту, і тим самим ефективно застосовувати технології координатного землеробства. До таких методів відноситься ультразвукове випромінювання (Antypchuk, 2018; Antypchuk & Mironenko, 2019).

Найбільш оптимальним на даний час для розв'язання проблеми ефективного розущільнення ґрунту є застосування пристроїв, які базуються на взаємодії ультразвукових коливань у ґрунті (Antypchuk, 2017), тому що затухання звукових хвиль у воді, осадових гірських породах та ґрунтах мізерне в порівнянні з електромагнітними хвилями. За швидкістю розповсюдження звукової хвилі в ґрунті можна зробити висновки про його механічні та фізичні властивості.

**Матеріали і методи досліджень.** Основними константами акустичної поведінки переущільненого шару ґрунту (плужної підшви) є такі інформативні параметри як: акустична жорсткість, яка показує залежність звукового тиску від амплітуди зсуву частинок середовища, та акустичний опір пластів ґрунту, який більш наочно

та узагальнено показує опір розповсюдженню звукової хвилі (Bschorr & Raida, 2020).

Плужна підшва через свій механічний та фізичний стан є абсолютно жорстким середовищем.

В акустиці взагалі не розглядаються абсолютно жорсткі тіла (середовища) через їхню нездатність пропускати звукову енергію. Проте, саме здатність плужної підшви не пропускати ультразвук, а швидко відбивати звукову хвилю, і дає всі підстави для проведення дослідження із застосуванням ультразвукового методу, адже для виявлення глибини залягання плужної підшви необхідно фактично виміряти відстань до неї на глибині.

В основу моделювання акустичного контакту ультразвуку з плужною підшвою (переущільнений шар ґрунту) з метою виявлення її глибини залягання використано методику В.А. Шутилова для проходження ультразвуку на межі розподілу двох твердих середовищ (Shutilov, 1980), проте дана модель розроблена з урахуванням специфіки акустичної поведінки плужної підшви та верхніх пластів ґрунту: їхня акустична провідність та швидкості розповсюдження звуку в них, їхній питомий хвильовий опір, коефіцієнт затухання (поглинання) ультразвуку різними видами ґрунтів, кути падіння, відбиття та заломлення ультразвукової хвилі.

Для проведення дослідження була розроблена експериментальна система оперативного керування глибиною ходу ґрунторозпушувача сільськогосподарського машинно-тракторного агрегату.

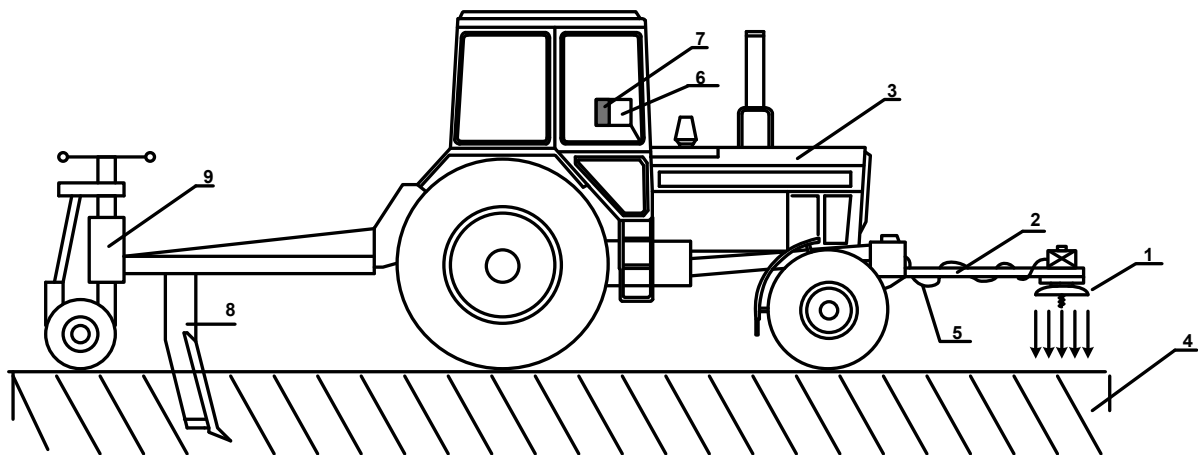
Проектування системи визначення глибини ущільненого шару ґрунту радіофізичними методами базувалося на розподілі її на конструктивні блоки. Для забезпечення надійності, універсальності, а також технологічності, спроектовану систему умовно було розділено на три функціональні блоки, а саме: приймально-передавальний пристрій випромінювання (УППВ), який містить у своїй будові систему датчиків для випромінювання та прийняття зондувальних ультразвукових імпульсів; електронний обчислювальний блок, який складається із генератора зондувальних імпульсів, приймача та мікроконтролера; блок керування, який містить дисплей.

Такий поділ є найбільш оптимальним, оскільки незалежно від будови та конструкції сільськогосподарського машинно-тракторного агрегату таку систему буде легко та раціонально встановлювати для забезпечення надійності роботи її основних робочих блоків, їхнього функціонування між собою, а також здійснювати її технічне обслуговування та за необхідності легко демонтувати.

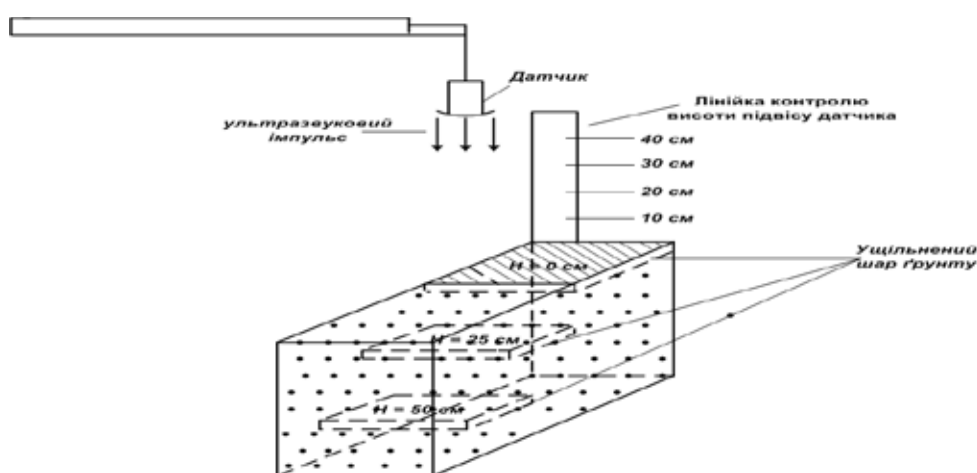
На рисунку 1 наведено схематичне зображення розробленого мобільного вимірювального комплексу для безконтактного визначення щільності ґрунту.

Програма експериментальних досліджень радіофізичного пристрою визначення глибини залягання найбільш ущільненого прошарку ґрунту (ПВГП) включала проведення лабораторних та лабораторно-польових робіт, якими передбачалося:

- 1) визначення необхідних для аналізу аналітичної залежності фізичних характеристик ґрунту;
- 2) встановити залежності сигналу датчика ПВГП від глибини залягання контрольної ущільненої поверхні в умовах одного типу ґрунту;



**Рис. 1. Мобільний вимірювальний комплекс для безконтактного визначення щільності ґрунту:**  
 1 – ультразвуковий приймально-передавальний пристрій випромінювання (УППВ); 2 – рама; 3 – МТА;  
 4 – ґрунт; 5 – система кабелів живлення та передачі інформації; 6 – електронно-обчислювальний блок;  
 7 – блок керування; 8 – ґрунтообробний орган; 9 – заглиблювальний пристрій.



**Рис. 2. Макет лабораторної установки для проведення досліджень ПВГП**

3) вивчення впливу глибини залягання в ґрунті ущільненої поверхні на зворотній ультразвуковий сигнал датчика ПВГП;

4) встановити залежності сигналу датчика ПВГП від типу ґрунту (чорнозем, пісок, глина);

5) вивчення впливу вологості ґрунту (вологість визначалась за допомогою вологоміра МГ-44) на показники ПВГП;

6) оцінка впливу висоти установки датчика ПВГП над поверхнею ґрунту на його показники;

7) оцінка впливу швидкості проходження ПВГП над заданою смугою поверхні ґрунту на його покази;

8) виробнича перевірка технічної можливості і ефективності використання ПВГП в технологічному процесі розуцільнення ґрунту.

Метою проведення даного дослідження як в лабораторних, так і в лабораторно-польових умовах було підтвердження теоретичних доводів того, що акустична поведінка плужної підшви ідентична акустич-

ній поведінці абсолютно твердого (жорсткого) тіла (середовища), що надає змогу застосовувати ультразвук для визначення глибини залягання плужної підшви.

Ще одним головним завданням дослідження, яке проводилось, було з'ясування економічного ефекту, тобто: чи впливає застосування ПВГП на зменшення витрат палива при проведенні технологічної операції по розуцільненню ґрунту.

Дослідження в лабораторних умовах проводилось за допомогою двох приймально-передавальних пристроїв випромінювання (датчиків): одно- та двоканальним.

Об'єктами досліджень були спеціально створені фізичні моделі ґрунту з різними рівнями залягання ущільненого матеріалу (дерево, ґрунт) в лабораторних умовах (рис. 2, 3).

Дослідження проводилось за трьома основними змінними факторами: глибина залягання ущільненого шару ґрунту ( $A(X_1)$ ), висота встановлення датчика над



Рис. 3. Установка датчика ПВГП на тракторі Т-150К

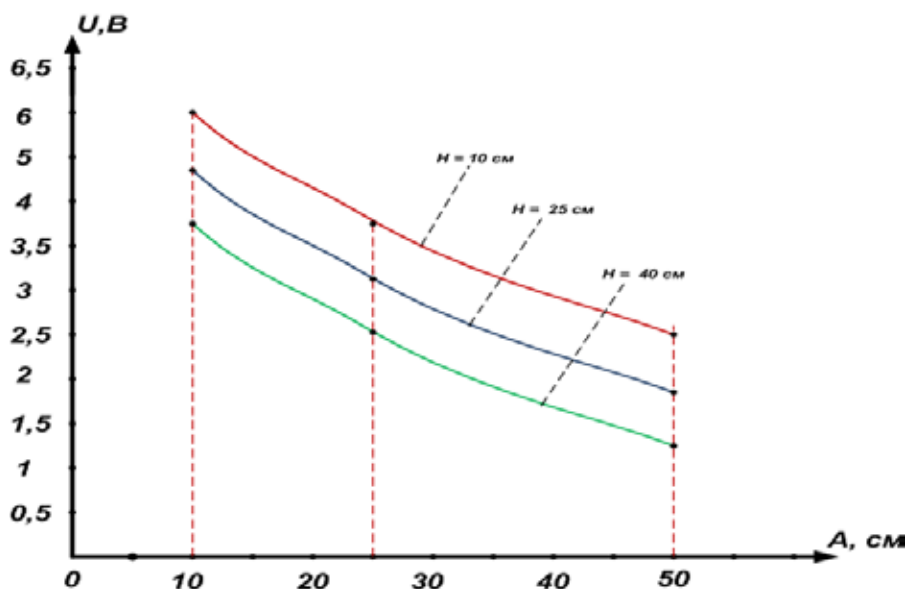


Рис. 4. Залежність показів ПВГП від глибини залягання ущільненого шару ґрунту

поверхню ґрунту ( $H(X_2)$ ), вологість ґрунту ( $\delta(X_0)$ ), ступінь вологості визначався у процентному співвідношенні (табл. 1).

Для визначення залежності показників датчика ПВГП від глибини залягання контрольної ущільненої поверхні в умовах одного типу ґрунту передбачалось встановлення датчика пристрою (рис. 3, 4) на заданій висоті (0,4 м; 0,3 м; 0,2 м) над спеціальною пересувною платформою, в якій на глибині (0,05 м; 0,25 м; 0,5 м) закладені однакові дошки, що імітують його ущільнений прошарок, засипані однорідним ґрунтом. Переміщаючи платформу таким чином, щоб безпосередньо під датчиком знаходилася дошка на відповідній глибині, фіксувались покази ПВГП.

Таблиця 1

Змінні фактори дослідження	
Глибина залягання ущільненого шару ґрунту $A(X_1)$	
-1	50 см
0	25 см
+1	0 см
Висота встановлення датчика над поверхню ґрунту $H(X_2)$	
-1	40 см
0	25 см
+1	10 см
Вологість ґрунту $\delta(X_0)$	
-1	54%
0	42%
+1	31%

За відомою методикою визначається аналітична залежність величини сигналу датчика від глибини залягання ущільненого шару ґрунту (Ermolov & Ermolov, 2006; Shutilov, 1980):

$$U = kH, \text{ [8, с. 81]} \quad (1.1)$$

де  $U$  – тиск на приймачі (Па),  $k$  – коефіцієнт відбиття ультразвукової хвилі (%),  $H$  – глибина залягання ущільненого шару ґрунту (см).

Значення вимірних глибин залягання ущільненого прошарку ґрунту знімалися з інформаційного табло мікропроцесорного блоку управління.

**Результати.** Результати визначення показів ПВГП ( $U, \text{м}$ ) від глибини залягання контрольної ущільненої поверхні ( $H = 0,05 \text{ м}; 0,25 \text{ м}; 0,5 \text{ м}$ ) в умовах одного типу ґрунту при встановленні датчика на заданій висоті ( $h = 0,4 \text{ м}; 0,3 \text{ м}; 0,2 \text{ м}$ ) представлені на рис. 4.

Аналіз одержаних результатів досліджень показує, що зі збільшенням глибини залягання ущільненого шару ґрунту збільшується похибка вимірювання (для глибини 0,25 м – від 4 до 14%, для глибини 0,5 м – від 6 до 16%). Той факт, що із збільшенням глибини залягання плужної підшви збільшувалась похибка вимірювання, свідчить про те, що через акустичний опір верхніх пластів ґрунту, знижувався коефіцієнт пропускання звукової енергії з одного шару в інший через енергетичні втрати звукової хвилі. Отже, чим глибше залягає переущільнений пласт ґрунту, тим більша похибка вимірювання.

Проведені лабораторні дослідження, а особливо польові, показали, що чим вище над поверхнею ґрунту розміщено ультразвуковий датчик, тим гірший сигнал, що реєструється. Це пов'язано з негативним впливом на ультразвуковий імпульс, що випромінюється, повітря та його температури (а в польових умовах ще

й вітру). Найбільш точні вимірювання були досягнуті при установці датчика на висоті 20 см (похибка становила 4–6%), а із збільшенням висоти установки похибка збільшувалась (рис. 5).

Результати визначення показів ПВГП глибини залягання контрольної ущільненої поверхні (0,5 м) в умовах одного типу ґрунту різної вологості (31%, 42%, 54%) при встановленні датчика на заданій висоті (0,4 м; 0,3 м; 0,2 м) представлені на рис. 6. Похибка вимірювань становила до 18%, тобто наявність у ґрунті води спричиняє часткове затухання звукової хвилі (зменшується її швидкість): чим вологіший ґрунт, тим слабше сигнал, який надходить до приймача, і якщо плужна підшва знаходиться на максимальній для неї глибині залягання (50 см), а верхній пласт ґрунту надто вологий, то сигнал може бути надто слабким, що призводить до неправдивих даних вимірювань.

Одним із завдань лабораторного дослідження було встановлення залежності сигналу датчика ПВГП від типу ґрунту. Датчик ПВГП встановлювався на висоті 0,2 м над спеціальною пересувною платформою. В пересувну платформу закладався по черзі ґрунт трьох типів: пісок, чорнозем та глина, на глибині 0,4 м закладались однакові дошки. Переміщаючи платформу таким чином, щоб під датчиком знаходилося відділення з тим, чи іншим ґрунтом, фіксувалось значення сигналу датчика. У результаті проведеного випробування було встановлено, що ці три типи ґрунту мають абсолютно різну ультразвукову пропускну спроможність (рис. 7).

Коли закладали на глибину 20 см дерев'яну дошку, імітуючи ущільнений шар, найшвидше сигнал повертався до датчика від піску, слабшим був сигнал від чорнозему, а при скануванні глини сигнал був ще гіршим. Без імітації ущільнення, сигнал до приймачів не повертався від жодного типу ґрунту, тобто хвиля затухала і в піску, і в чорноземі, і в глині.

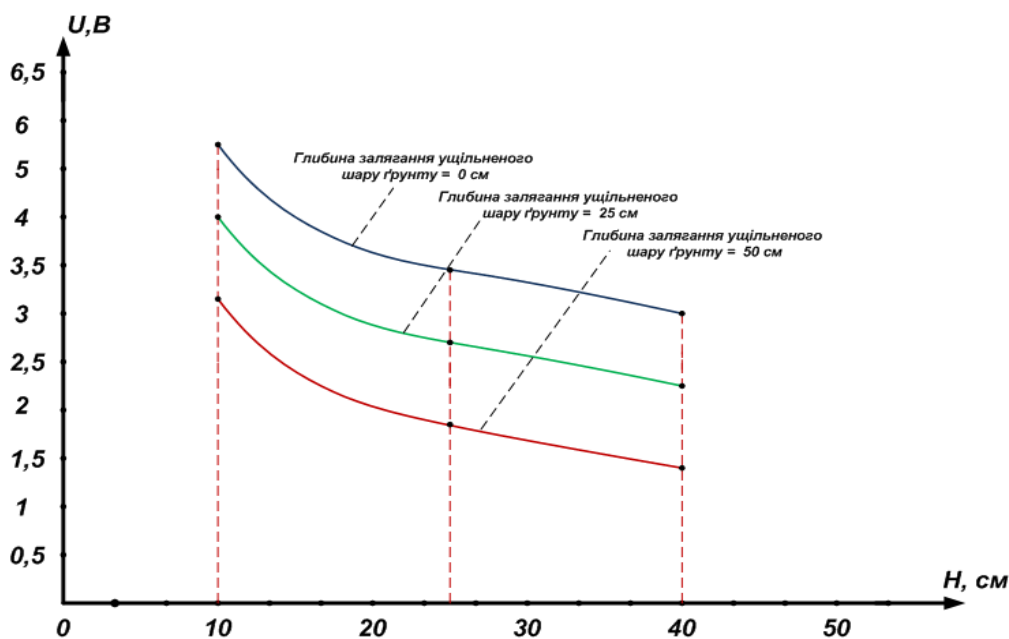


Рис. 5. Залежність сигналу датчика ( $U$ ) від висоти його встановлення над поверхнею ґрунту

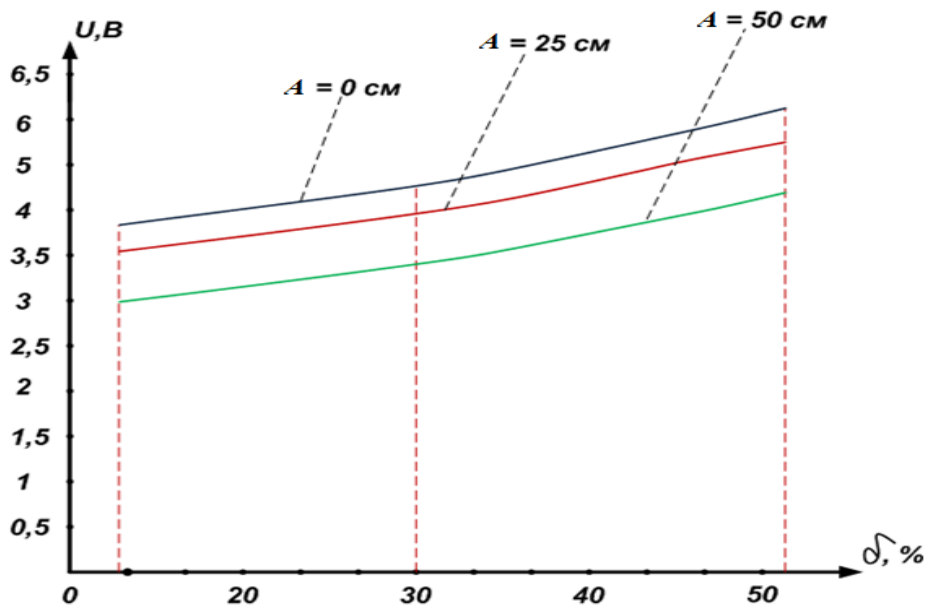


Рис. 6. Залежність показів ПВГТ від вологості ґрунту

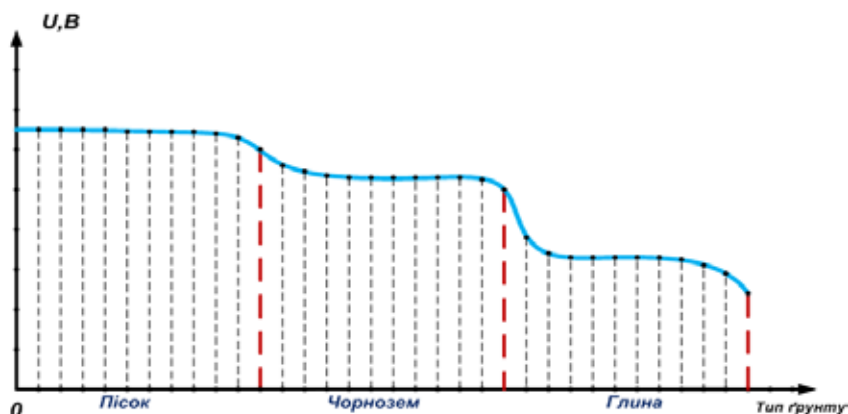


Рис. 7. Встановлення залежності сигналу датчика від типу ґрунту

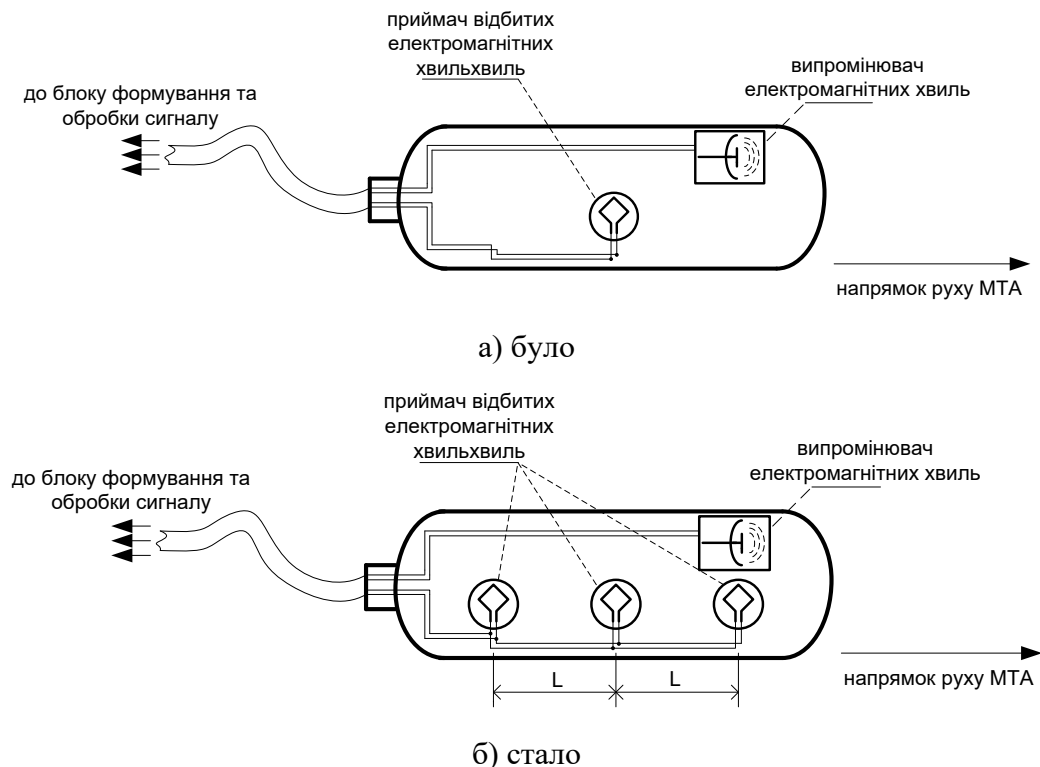
Проте для нашого дослідження така поведінка ультразвуку з різними типами ґрунтів особливого значення не має, тому що основна мета – це виявлення плужної підшви, а її акустична поведінка однакова для будь-якого типу ґрунту, крім піску, де хвиля завжди затухає.

**Обговорення.** Враховуючи те, що донині ультразвук не застосовувався для визначення щільності ґрунту під час руху МТА, було прийнято рішення випробувати розроблений пристрій з одним датчиком, який випромінював і приймав відбитий сигнал. Після проведення перших лабораторних досліджень, які здійснювались ультразвуковим приймально-передавальним пристроєм випромінювання (УПППВ) з одним каналом, отримавши досить непогані результати, але, врахувавши всі об'єктивні фактори, пов'язані з механічними та фізичними властивостями ґрунтів, а також, беручи до уваги природний стан ґрунтів, зважаючи на те, що ґрунт, особливо в польових умовах – надзвичайно складне для проходження ультразвуку, з неоднорідною поверхнею середовище,

було прийнято рішення вдосконалити датчик (рис. 8), додавши два додаткових елементи, які будуть призначені лише для приймання відбитих сигналів. Тобто один елемент датчика випромінює і приймає сигнал, а два інші – лише приймають, що дало б змогу реєструвати найсильніший сигнал, що відбився від поверхні ґрунту.

Після встановлення двох додаткових елементів повсіх чотирьох параметрах лабораторного дослідження: глибина залягання плужної підшви, висота встановлення датчика над поверхнею ґрунту, вологість ґрунту, тип ґрунту, прийнятий датчиком сигнал став якіснішим. Похибка вимірювання загалом зменшилась на 1–3%, а при зволоженому ґрунті становила 14–16%. Прийнятною також стала висота встановлення датчика до 25 см.

**Висновки.** Алгоритм роботи УПППВ полягає в тому, що він виводить на блок індикації тільки ті відбиті сигнали, глибина яких при двох послідовних вимірах змінилась не більше ніж на 2% від заданої межі зондування, яка, до речі, не перевищує 4 метри. Це дає змогу від-



**Рис. 8. Вдосконалення конструкції датчика визначення глибини залягання ущільненого шару ґрунту**

сіяти перешкоди, які здійснюватиме, наприклад, двигун самого машинно-тракторного агрегату.

При збільшенні глибини залягання ущільненого шару ґрунту збільшується похибка вимірювання (для глибини 0,25 м – від 4 до 14%, для 0,5 м – від 6 до 16%).

Найбільш точні вимірювання були досягнуті при установці датчика на висоті 20 см.

Похибка вимірювання після встановлення на УПППВ двох додаткових елементів загалом зменшилась на 1-3%, а при зволоженому ґрунті становила 14–16%. Прийнятною також стала висота встановлення датчика до 25 см.

Значення визначених глибин залягання ущільненого прошарку ґрунту ультразвуковим пристроєм і твердоміром Ревякіна відрізнялися від –9,4 до +16,4%.

#### **Бібліографічні посилання:**

1. Antypchuk, B.O. (2018). Zalezhnist tochnosti vymiru hlybyny zaliahannia pluzhnoi pidoshvy vid vysoty vstanovlennia ultrazvukovoho datchyka-peretvoriuvacha nad poverkhneiu hruntu [Dependence of accurate measurement of solid soil depth on the height of sensor installation above the soil]. International Multidisciplinary Conference "Science and technology of the present time: priority development directions of Ukraine and Poland" (19–20 October 2018). Wolomin: Baltija Publishing, V. 1, pp. 86–89 (in Ukrainian)
2. Antypchuk, B.O. (2017). Ultrazvukovi eksperymentalnyi prystrii – osnovnyi element avtomatyzovanoi systemy keruvannia polozhenniam hruntorozpushuvacha [Ultrasonic experimental device – the main element of the automated control system of soil rake position]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn : zahalnoderzh. mizhvidomch. nauk.-tekhn. zb.* [Design, production and operation of agricultural machinery: national interdepartmental scientific and technical collection]. Kropivnitskiy: CSTU, V. 47, Part 1, pp. 47–51. (in Ukrainian)
3. Antypchuk, B., Mironenko V. (2019). Modeling of definition of a depth of the condensed soil layer ultrasound and formation of an acoustic signal. *New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries: monograph.* Riga: Baltija Publishing, pp. 1–19. doi:10.30525/978-9934-588-15-0-48
4. Ahmed, M. (2020). Advances in Projectile Penetration Mechanism in Soil Media. *Applied Sciences*, No. 10, pp. 1–28. doi:10.3390/app10196810
5. Ahrens, C.J., Paige, D.A., Eubanks, T.M., Blasé, W.P., Mesick, K.E., Zimmerman, W., Petro, N., Hayne, P.O., Price, S. (2021). Small penetrator Instrument Concept for the Advancement of Lunar Surface Science. *The Planetary Science Journal*, V. 2, No. 1, pp. 1–11. doi:10.3847/PSJ/abda4f
6. Bschorr, O., Raida, H.-J. (2020). One-Way Wave Equation Derived from Impedance Theorem. *Acoustics*, V. 2(1), pp. 164-170. doi:10.3390/acoustics2010012
7. Ebato, M. (2020). Evaluation of Soil Hardness in Paddy Fields by Cone Penetrometer as a Simple Soil Physical Diagnosis Method. *Agricultural Information Research*, V. 29(1), pp. 24–39. doi:10.3173/air.29.24
8. Ermolov, I.N., Ermolov, M.I. (2006). *Ultrazvukovoi kontrol: navch. posib.* [Ultrasonic inspection: a textbook]. Moscow: Azimuth, 208 p. (in Russian)

9. Pershi rezultaty proektu «tsyfrova tekhnolohiya zemli» [First results of the “digital earth technology” project]. (2019). Proposition, No. 11 (290), pp. 170–174 (in Ukrainian)
10. Gogolinskiy, K.V., Syasko, V.A., Umanskiy, A., Nikazov, A., Bobkova, T. (2019). Mechanical properties measurements with portable hardness testers: advantages, limitations, prospects. Journal of Physics Conference Series, V. 1384(1), pp. 1-7. doi:10.1088/1742-6596/1384/1/012012
11. Hashemi, M., Nikudel, M.R. (2016). Application of Dynamic Cone Penetrometer test for assessment of liquefaction potential. Engineering Geology, V. 208, pp. 51-62. doi:10.1016/j.enggeo.2016.04.013
12. Heric, J.E., Jones, T.L. (2002). A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. Soil Science Society of America Journal, V. 66. pp. 1320–1324.
13. Latvala, J., Luomala, H., Kolisoja, P. (2020). Determining Soil Moisture Content and Material Properties with Dynamic Cone Penetrometer. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, V. 15(5), pp. 136–159. doi:10.7250/bjrbe.2020-15.511
14. Lee, Jong-Sub, Byun, Yong-Hoon (2020). Instrumented Cone Penetrometer for Dense Layer Characterization. Sensors, V. 20(5782), pp. 1–19. doi:10.3390/s20205782
15. Rezaeva, A. (2017). Design, construction and evaluation of a digital hand-pushed penetrometer. International Journal of Advanced Smart Sensor Network Systems (IJASSN), V. 7, No. 1, pp. 1–10. doi:10.5121/ijassn.2017.7101
16. Saye, S. R., Kumm, B. P., Lutenecker, A. J. (2020). Estimating the OCR in Uniform Cohesive Soil with Cone Penetrometer Tests Considering Soil Structure and Index Properties. Canadian Geotechnical Journal, No. 10, pp. 1-48. doi:10.1139/cgj-2020-0293
17. Shutilov, V.A. (1980). *Osnovy fiziki ultrazvuka [Fundamentals of Ultrasound Physics]*. Leningrad: Leningrad University, 280 p. (in Russian)
18. Surdu, M.M., Mognevsky, V.M., Lameco, O.L., Lastovchenko, O.M. (2002). *Vymiruvach tverdosti, volohy ta temperatury gruntu [Soil hardness, moisture and temperature meter]*. Science Book of NAU “Mechanization of agricultural production”, No. 129, pp. 135–138 (in Ukrainian)
19. Thiel, D., Worsey, M., Klodzinski, F., Emerson, N., Espinosa, H. (2020). A Penetrometer for Quantifying the Surface Stiffness of Sport Sand Surfaces. Proceedings, V. 49(64), pp. 1–6. doi:10.3390/proceedings2020049064
20. Vakili, A.H., Salimi, M., Shamsi, M. (2021). Application of the dynamic cone penetrometer test for determining the geotechnical characteristics of marl soils treated by lime. Heliyon, V. 7(9), pp. 1–7. doi:10.1016/j.heliyon.2021.e08062
21. Vashko, A., Sovik, J., Krynke, M. (2019). Determination of accuracy and reliability of portable hardness testers. Quality Production Improvement – QPI, V. 1(1), pp. 289–295. doi:10.2478/cqpi-2019-0039
22. Wijewardane, N.K., Hetrick, S., Ackerson, J., Morgan, C.L. S.; Ge, Y. (2020). VisNIR integrated multi-sensing penetrometer for in situ high-resolution vertical soil sensing. Soil and Tillage Research, V. 199, pp. 1–10. doi:10.1016/j.still.2020.104604

**Antypchuk B. O.**, Zhytomir agrotechnical professional college, Zhytomir, Ukraine

**MODERN SOIL DENSITY MEASURES: A REVIEW AND STUDY OF USING ULTRASOUND FOR OPERATIVE DEFINITION OF A COMPACTED AREA OF A CULTIVATED FIELD**

*The changes taking place in the agro-industrial complex require the development and creation of new implements and machines and the improvement of existing ones. This, in turn, is possible only when considering the cultivation of the soil as an addition to the natural processes of formation of the soil itself, taking into account the biological, physical and mechanical properties, as well as reducing energy costs for its processing, as agro technical activities of the basic cultivation of the soil from an economic point of view is the most energy-consuming among the whole complex of technological operations of growing and harvesting crops. Therefore, the problem of creating energy-saving technologies and technical means of tillage that contribute to this preservation is nothing but a problem of ecological and energy importance, which cannot be solved simply by reducing the depth of tillage.*

*Thus, to solve these issues, it is necessary to apply more advanced methods of cultivation, in particular loosening the soil. It is important to provide technical support for this technological operation in modern crop production in order to incur the lowest energy costs and increase crop yields.*

*The article analyzes the existing modern devices for measuring soil density in the mode of continuous registration: penetrometers, penetrometers, digital hardness meters, GPS penetrometers, and also considers the issue of using ultrasound to detect compacted areas of the cultivated field. Acoustic behavior of dense soil and its basic acoustic constants are considered: acoustic stiffness and acoustic impedance.*

*The main results of the conducted research on the basis of the developed model of the operational system to determine the depth of a compacted layer of soil using the radio physical method of studying the mechanical and physical properties of the soil, which are based on ultrasound radiation, the method of continuous radio-wave profiling in motion, that is, the tractor unit at the moment of the field, the method of synthesis of technical means, the theory of automatic control with application of the ultrasound device to determine the depth of the dense soil layer.*

*The analysis of the obtained results using a sensor with one and two channels of the receiving and transmitting path is carried out. The optimal height of the sensor installation above the ground surface is investigated.*

**Key words:** penetrator, penetrometer, soil ripper, density meter, ultrasound, radio physical device, sensor, dense soil, receiving and transmitting radiation device, acoustic conductivity.

*Дата надходження до редакції: 09.12.2021 р.*