

## ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 631.171:534-8

*Антипчук Б.О.*

Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства»  
Національної академії аграрних наук України

### ЧИ ДОЦІЛЬНО ЗАСТОСОВУВАТИ УЛЬТРАЗВУКОВИЙ МЕТОД У РОБОТІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВІЯВЛЕННЯ ГЛИБИНИ ЗАЛЯГАННЯ УЩІЛЬНЕНОГО ШАРУ ҐРУНТУ?

*У статті, огляду на закони й основні положення акустики, розглядається питання ефективності практичного застосування ультразвукового методу в роботі автоматизованої системи розуцільнення ґрунту в процесі його обробки. Саме завдяки певним властивостям середовища можливе проходження в ньому звукової хвилі. Чи мають такі властивості ґрунти? Даючи відповідь на це запитання, проводимо аналіз впливу механічної структури ущільненого ґрунту на проходження ультразвукової хвилі. Які основні параметри проходження ультразвуку враховані в роботі експериментального радіофізичного пристрою цієї автоматизованої системи? Як впливає хвильовий опір ущільненого ґрунту на показники роботи пристрою та системи загалом? На всіх цих питаннях, які є важливими в роботі цієї автоматизованої системи, зосереджено особливу увагу.*

**Ключові слова:** автоматизація виробництва, ультразвук, пружна хвиля, коефіцієнт відбиття, швидкість звуку, модуль пружності, хвильовий опір.

**Постановка проблеми.** Сучасний представник агробізнесу зацікавлений у тому, щоб максимально автоматизувати процеси на своєму виробництві, тому сільське господарство в теперішніх умовах є однією з галузей, де автоматизація проходить прискореними темпами. Саме автоматизація виробництва багато в чому сприяє високій конкурентоздатності й рентабельності підприємства.

Розроблення автоматизованої системи виявлення глибини залягання ущільненого шару ґрунту (плужної підшви), яка спроектована на основі ультразвукового методу, дасть змогу вирішити два надзвичайно важливі для аграрного виробника питання: збільшення врожайності сільськогосподарських культур за рахунок покращення кореневого живлення рослин у результаті уникнення поверхневого розуцільнення ґрунту та економія палива.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Активне впровадження сучасних систем автома-

тизації АПК наситило ринок базовими технологіями моніторингу сільськогосподарської техніки, такими як GPS-трекери, датчики рівня і витрат палива тощо. Але натепер не всі процеси вдається контролювати в автоматичному режимі. Серед них й автоматизація розуцільнення ґрунту. У силу поставленого завдання найбільший інтерес становила література з основ акустики, ультразвуку, електроніки, радіометрії та механіки й фізики ґрунтів.

Виявляється, що ультразвукові коливання з ґрунтом практично не досліджуються в ехолокації через неможливість застосування ультразвуку для підповерхневого зондування землі на велику глибину, проте ультразвук уже давно застосовують для хімічного та механічного аналізу ґрунтів [5, с. 18–22]. Також чимало є досліджень відносно швидкості звукової хвилі в ґрунтах з метою визначення їх міцності [5, с. 77–86].

**Постановка завдання.** Опираючись на власні проведені дослідження та основи акустики, за мету

ставиться доведення наявності ефекту непроходження звуку крізь надущений шар ґрунту через його механічні й фізичні властивості. Саме з урахуванням такого ефекту та часового проміжку повернення хвилі ультразвуковий метод можна сміливо використати в роботі цієї автоматизованої системи, тим паче що глибина сканування не є надто великою.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Спочатку з'ясуємо, що являє собою ця автоматизована система (рисунок 1).

Про принцип роботи цієї системи вже є публікації. Варто лише зазначити, що, згідно із зображенням на дисплеї блоку індикації та керування, водій збільшує або зменшує глибину ходу ґрунторозпушувача, тим самим уникаючи поверхневого розушлінення ґрунту й надмірного витрачання паливних ресурсів. Як видно з рисунка 1, основним елементом цієї системи є ультразвуковий датчик, проте застосування ультразвуку в ехолотації ґрунтів завжди викликає багато суперечок, і це справедливо, адже ґрунти – це не зв'язані між собою частинки, аморфна структура, яка не здатна передавати деякий діапазон частот.

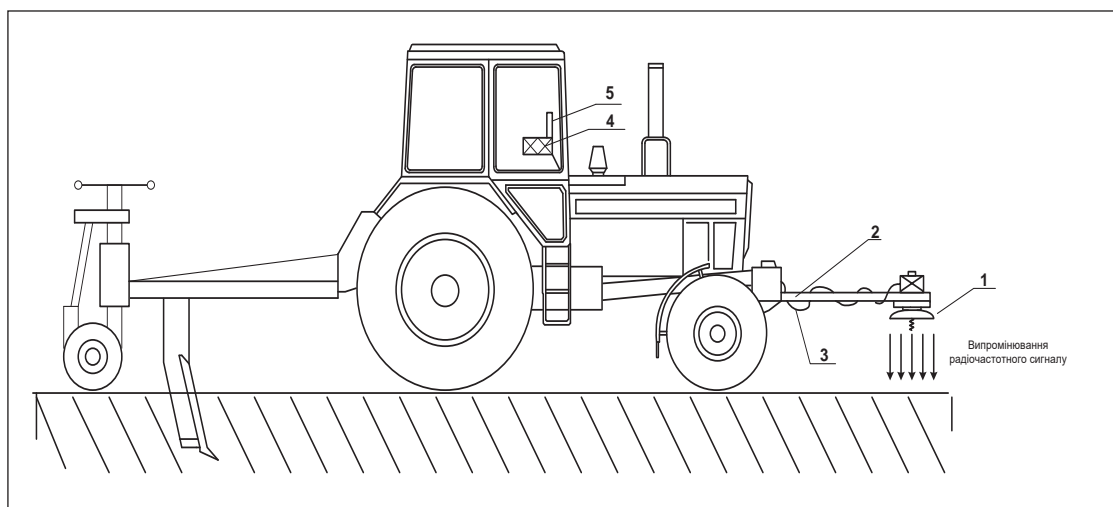
Щоб проаналізувати можливість використання ультразвукового методу в автоматизованій системі розушлінення ґрунту, потрібно розібратись у процесах розповсюдження ультразвуку й з'ясувати, що являє собою ущільнений ґрунт як акустичне середовище.

Ультразвук – це механічні коливання частинок середовища, які розповсюджуються в ній у

виділі поперемінних стиснень і розрідження середовища. Якщо в певному об'ємі середовища спричинити механічне збудження, то частинки середовища цього об'єму зміщуються з положення спокою й починають рухатись. Через пружні сили, які діють між частинками, рух, що виник, буде послідовно передаватись частинкам сусіднього об'єму, деформуючи його, і збудження з деякою швидкістю буде розповсюджуватись у середовищі від одного об'єму до іншого. Такий рух прийнято називати хвильовим рухом або хвилею. Причому картина розповсюдження пружних хвиль буде однаковою в будь-якому середовищі: твердому, рідкому та газоподібному.

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 у середовищі під час деформації, чим 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 й інерційні властивості середовища. Від інших властивостей середовища його акустична поведінка не залежить [3, с. 10].

Саме всі механічні властивості ґрунтів і були враховані в роботі експериментального імпульсного електронного пристрою цієї системи, який



**Рис. 1. Схема МТА з автоматизованою системою ґрунторозпушування:**  
 1 – ультразвуковий датчик-випромінювач; 2 – рама пристрою; 3 – система кабелів живлення та передачі інформації, які з'єднують ультразвуковий датчик-випромінювач з блоком формування, прийому й обробки сигналів; 4 – блок формування, прийому та обробки сигналів; 5 – блок індикації та керування

працює на акустичних та ультразвукових частотах. Основним урахованим параметром є нездатність надуцільненого шару ґрунту пропускати звук і, як наслідок, провокування швидкого відбиття хвилі з відповідним зображенням на дисплеї пристрою.

Властивість середовища проводити акустичну енергію, в тому числі й 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 такою формулою:

$$Z = \rho c, \quad (1)$$

де  $Z$  – хвильовий опір, кг/(м<sup>2</sup>с);  $\rho$  – щільність, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – швидкість звуку, м/с. Або за іншою формулою:

$$Z = \sqrt{E\rho}, \quad (2)$$

де  $E$  – модуль пружності, Н/м<sup>2</sup>;  $\rho$  – щільність, кг/м<sup>3</sup>.

Хоча пружність є загальною властивістю природних тіл, але ґрунти як дисперсні утворення можуть бути пружними лише за певних умов. Наприклад, у разі стиснення в піщаних ґрунтах пружні сили виникають, але при цьому піщинки розтягуються й 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. У надуцільненому ж ґрунті спостерігається ефект опору твердих частинок деформаційним процесам, і чим щільніший ґрунт, тим цей опір є сильнішим, тим швидше відбивається хвиля.

Для розрахунку імпедансу ґрунтів можна скористатись такою формулою:

$$Z = \rho c, \quad (3)$$

де – хвильовий опір, кг/(м<sup>2</sup>с);  $\rho$  – щільність, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – швидкість звуку, м/с. Або за іншою формулою:

$$Z = \sqrt{E\rho}, \quad (4)$$

де  $E$  – модуль пружності, Н/м<sup>2</sup>;  $\rho$  – щільність, кг/м<sup>3</sup>.

У свою чергу, модуль пружності визначається із закону Гука як коефіцієнт співвідношення між напруженням навантаження  $\sigma$  на ґрунт і відповідною його деформацією  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma, \quad (5)$$

проте для ґрунту вимір пружності є достатньо складним. Складність прямих вимірів полягає у визначенні деформації ґрунту від навантаження, яке не викликає руйнування його структури.

Від модуля пружності залежить швидкість звуку в середовищі, яку можна визначати за формулою для пружного середовища: за модулем пружності  $E$  (модуль Юнга) та щільності (чим більша щільність середовища, тим менша швидкість звуку в середовищі):

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (6)$$

Швидкість звуку є також важливим параметром, який урахований у роботі цієї автоматизованої системи. З того, якою є швидкість проходження сигналу, роблять висновки про механічні, деформаційні та інші фізичні параметри ґрунтів.

Ґрунт є шаруватим напівпростором. У разі падіння 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 шарів.

Якщо плоска хвиля  $p(t - z/c)$  падає на межу двох однорідних середовищ, тоді в першому середовищі виникає відбитий хвиля  $\bar{p}(t + z/c)$ , а в іншому – хвиля, що проходить  $p'(t - z/c')$ . Відбиту хвилю й ту, що пройшла, можемо записати так:

$$\bar{p} = \nu p(t + z/c), \quad (7)$$

$$p' = \mathcal{W} p(t - z/c'). \quad (8)$$

Для гармонічних хвиль падаюча, відбита і прохідна будуть мати вигляд:

$$p = e^{-ikz}, \quad (9)$$

$$\bar{p} = V \cdot e^{-ikz}, \quad (10)$$

$$p' = W e^{-ik'z} \quad (11)$$

З формул Френеля:

$$\mathcal{W} = \frac{2p'c'}{p'c' + pc}, \quad (12)$$

$$V = \frac{2p'c'}{p'c' + pc} \quad (13)$$

видно, що коефіцієнти відбиття  $V$  і проходження  $\mathcal{W}$  визначаються лише властивостями середовища й залежать не від форми хвилі, не від самих значень хвильових опорів, а від їх відношення:

$$\dot{Z} = \frac{p'c'}{pc}. \quad (14)$$

Таке відношення  $Z$  називається відносним хвильовим опором;  $\rho$  – щільність ( $\text{кг/м}^3$ ) та  $p'$  – швидкість звуку ( $\text{м/с}$ ) хвилі, що проходить в інший шар ґрунту;  $p'$  – щільність ( $\text{кг/м}^3$ ) та  $c'$  швидкість звуку ( $\text{м/с}$ ) відбитої хвилі.

Якщо хвильові опори рівні для обох шарів, тоді для нормального падіння плоскої хвилі прошарки ґрунту акустично не розрізняються: відбиття хвилі від першого шару не відбувається і хвиля йде в інший шар. Для такого повного проходження зовсім не обов'язково, щоб щільність цих пластів ґрунту і швидкість звуку в них були однакові, тобто не обов'язковий збіг механічних

властивостей, достатньо рівності співвідношення щільності на швидкість звуку.

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

$$\tau_{\text{проп}} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1+Z_2)^2} \quad (15)$$

Інтенсивність проходження хвилі залежить від тривалості зонduючого імпульсу. Період слідування імпульсів визначається таким міркуванням: до отримання відбитого від ущільненого шару ґрунту сигналу повторне випромінювання не відбувається. Період зонduючого імпульсу знаходимо за такою формулою:

$$T \geq \frac{2H_{\text{max}}}{c}, \quad (16)$$

де  $T$  – період зонduючого імпульсу;  $H_{\text{max}}$  – максимальна глибина зондування;  $c$  – швидкість звуку.

Варто відмітити, що ущільнений шар ґрунту (плужна підшва) зазвичай залягає на глибині близько 25 см, тобто не є поверхневим шаром. Це відбувається внаслідок певних технологій обробки ґрунту. Тому більш акустично м'яким є зазвичай верхній шар, а отже, більший хвильовий опір має ущільнений шар ґрунту, тобто  $Z_1 < Z_2$ .

Плужна підшва являє собою збитий, без повітряних фаз і рідини пласт, є абсолютно жорстким середовищем.

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 щодо падаючої хвилі: буде пропускати хвилю чи стане жорсткою перепорою. В акустиці доцільно порівнювати лише хвильовий опір середовищ, тобто відношення щільності до здатності стискатись. Жорсткішим буде той пласт, для якого це відношення більше. Такі обставини лише підкреслюють своєрідність хвильових задач з урахуванням механіки середовищ і тіл.

У разі повернення хвилі з другого шару в перший коефіцієнт відбиття залежатиме від хвильового опору першого.

Більшість ґрунтів, як відомо, мають щільність від 1000 до 1500  $\text{кг/м}^3$ . Швидкість розповсюдження звуку в ґрунтах змінюється від 85 до 180  $\text{м/с}$  [6, с. 50]. Це все показники для ґрунтів у природному стані. Ущільнений шар ґрунту, який

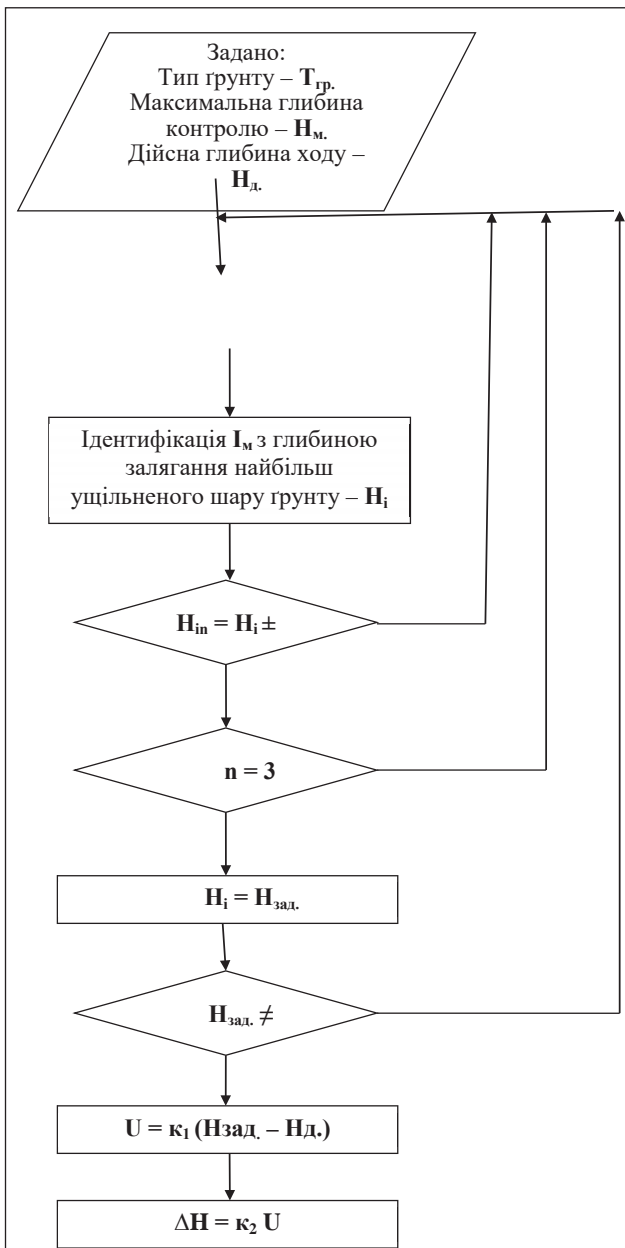


Рис. 2. Алгоритм формування керуючого сигналу на зміну глибини ходу робочого органу розущільнювача ґрунту



утворюється внаслідок господарської діяльності людини, має зовсім малу пористість і через практичну відсутність води й повітря чинить досить суттєвий хвильовий опір.

У літературі вже є розрахунки стосовно хвильового опору ґрунтів (таблиця 1) [6, с. 50]. Жирним шрифтом виділено значення, характерні для найбільш розповсюджених  $c$  і  $\rho$ .

Таблиця 1

**Хвильовий імпеданс (103, Па.с/м.) ґрунту при різних значеннях щільності і швидкості пружної хвилі [6, с. 50]**

c, м/с	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>					
	1000	1100	1200	1300	1400	1500
85	<b>85</b>	93,5	102	110,5	119	127,5
100	<b>100</b>	<b>110</b>	120	130	140	150
140	140	<b>154</b>	<b>168</b>	182	196	210
180	180	198	<b>216</b>	<b>234</b>	252	270
220	220	242	264	<b>286</b>	<b>308</b>	330
260	260	286	312	338	<b>364</b>	<b>390</b>
300	300	330	360	390	420	<b>450</b>

Як видно з таблиці, за будь-якої швидкості звуку при збільшенні щільності ґрунту зростає його хвильовий опір.

Хвильовий опір також впливає й на здатність звукової хвилі затухати в середовищі. Так, наприклад, у піщаних і супіщаних ґрунтах з часом звук затухає через втрату своєї енергії, яка перетворюється в інші види енергії, зокрема в теплову, тому що такі види ґрунтів практично не чинять хвильового опору і хвиля не може відбитись. Зовсім зворотна картина зі щільними й надущільненими ґрунтами. Саме ефект поглинання, розсіювання (дифракції) й відбиття хвилі є найважливішими параметрами в роботі експериментального ультразвукового пристрою цієї автоматизованої системи.

Поглинання виражається або в децибелах на метр (дБ/м), або в неперах на метр (Нп/м) і є результатом тертя між собою частинок середовища, в різних середовищах воно різне. Поглинання ультразвуку також залежить від частоти ультразвукових коливань. Теоретично воно пропорційне квадрату частоти.

Затухання хвилі, яке обумовлене розсіюванням і поглинанням, описується за експоненціальним законом спадання амплітуди з відстанню. На високих частотах, коли легко створити плоску хвилю, а поглинання звуку значне, коефіцієнт затухання для плоскої хвилі за амплітудою з відстанню описується так:

$$\alpha = \frac{1}{L} \ln \left( \frac{p(0)}{p(L)} \right), \quad (17)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт затухання з відстанню, 1/м;  $L$  – відстань, м;  $p(0)$ ,  $p(L)$  – амплітуда звукового тиску у вихідній точці й на відстані  $L$ , Па.

Такий спосіб не застосовується для низьких частот. Для низьких частот підходить коефіцієнт затухання за часом:

$$\beta = \frac{1}{T} \ln \left( \frac{p(0)}{p(T)} \right), \quad (18)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт затухання від часу, 1/м;  $L$  – відстань, м;  $p(0)$ ,  $p(T)$  – амплітуда звукового тиску на початку й через час  $T$ , відповідно, Па.

Ґрунт особливо в польових, а не в лабораторних умовах – середовище з неоднорідною поверхнею: рослинний покрив, нерівності, також наявність повітряних ям. Усе це спричинює ефект дифракції – розсіювання звукових пучків при віддаленні від випромінювача, що може спричинити спотворення сигналів, і компенсацію таких спотворень можна здійснити за допомогою математичного алгоритму (рисунок 2).

**Висновки.** Від глибини обробки ґрунту залежить його родючість. Саме завдяки автоматизації процесів обробітку ґрунту будуть дотримані не лише всі технологічні процеси, а й буде відчутною економія паливних ресурсів. Здебільшого застосування ультразвуку в автоматичних процесах обробітку ґрунту поки що неможливе. Але завдяки механічним і фізичним властивостям ущільненого шару ґрунту, тобто через їх суттєвий хвильовий опір і невелику глибину залягання плужної підшви, ультразвукові методи цілком можливі для застосування саме в роботі автоматизованої системи розуцільнення ґрунту.

**Список літератури:**

1. Бриндли К. Измерительные преобразователи. Москва, 1991. С. 99–106.
2. Исакович М.А. Общая акустика. Москва, 1973. С. 386–392.
3. Мироненко В.Г. Передумови та особливості створення елементів штучного інтелекту в системах оперативного керування АПК. Вісник аграрної науки. 2016. № 5. С. 47–51.
4. Мироненко В.Г., Антипчук Б.О. Пристрій оперативного визначення глибини залягання плужної підшви в процесі її розуцільнення. Механізація та електрифікація сільського господарства: загальнодерж. зб. Глевах: ННЦ «ІМЕГС», 2017. Вип. 5 (104). С. 28–34.

5. Нерпин С.В. Физика почвы. Москва, 1967. С. 18–22, 77–86.

6. Нецветов М.В. Скорость звука и модуль упругости почвы: измерение и роль в передаче вибраций дерева на почву. Грунтознание. Донецк: Донецк. ботан. сад, 2010. Т. 11. С. 48–52.

### **ЦЕЛЕСООБРАЗНО ЛИ ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА В РАБОТЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ УПЛОТНЕННОГО СЛОЯ ПОЧВЫ?**

*В статье с учетом законов и основных положений акустики рассматривается вопрос эффективности практического применения ультразвукового метода в работе экспериментальной автоматизированной системы разуплотнения почвы в процессе ее обработки. Именно благодаря определенным свойствам вещества возможно прохождение в нем звуковой волны. Есть ли такие свойства у почв? Давая ответ на этот вопрос, проводим анализ влияния механической структуры уплотненной почвы на прохождение звуковой волны. Какие основные параметры прохождения ультразвука учтены в работе экспериментального радиофизического прибора данной автоматизированной системы? Как влияет волновое сопротивление уплотненной почвы на показатели работы прибора и системы в целом? На всех этих вопросах как особенно важных в работе данной автоматизированной системы сосредоточено особенное внимание.*

**Ключевые слова:** автоматизация производства, ультразвук, упругая волна, коэффициент отражения, скорость звука, модуль упругости, волновое сопротивление.

### **IS IT ADVISABLE TO USE AN ULTRASONIC METHOD IN WORK OF THE AUTOMATED SYSTEM OF DEFINITION OF THE DEPTH OF THE CONDENSED LAYER OF SOIL?**

*Considering laws and basic provisions of acoustics, in article the question of efficiency of practical application of an ultrasonic method in work to the experimental automated system on loosening of the soil in the course of its processing is considered. Thanks to certain properties of substance passing in it a sound wave is possible. Have whether soils such properties? For the answer to this question the analysis of influence of mechanical structure of the condensed soil on passing of a sound wave is carried out. How the mechanical structure of the dense soil influences on the sound waves? What key parameters of passing of ultrasound were considered in operation of the experimental radio physical device of this automated system? How the wave resistance of the condensed soil influences on results of work of the device and all system? On all these questions as especially important in work of this automated system, the special attention is concentrated.*

**Key words:** production automation, ultrasound, elastic wave, reflection coefficient, sound speed, elasticity module, wave resistance.