Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2019, Vol. 10, No 2, 103-107
ISSN 2663-1334 (print), ISSN 2663-1342 (online), www.journals.nubip.edu.ua/index.php/Tekhnica

DOI: 10.31548/machenergy.2019.02.103-107

УДК 624.236

ХВИЛІ РОЗВАНТАЖЕННЯ ПРИ ОБРОБЦІ УЩІЛЬНЕНИХ ГРУНТІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Ю. В. Човнюк, Ю. О. Гуменюк, І. М. Сівак

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

Кореспонденція авторів: sivakim@ukr.net.

Історія статті: отримано – квітень 2019, акцептовано – червень 2019.
Бібл. 3, рис. 3, табл. 0.

Анотація. Розглянуті умови руйнування при обробці ущільнених ґрунтів сільськогосподарського призначення (ГСП) при їх швидкому розвантаженні. Розглянутий напружено-деформований стан масиву ГСП після його сколу, удару, ударно-вібраційного або іншого імпульсу. Визначені тривалість, положення поверхні і деформації розриву ГСП, вплив на процес тертя і границі зони руйнування ґрунту. Обґрунтовані фізико-механічна й математична моделі, які адекватно описують процеси розповсюдження хвиль розвантаження у ГСП при їх обробці/ руйнуванні робочими органами сільськогосподарських (ґрунтообробних) машин. Розглянута динаміка руйнування ґрунтів при механізації земляних робіт з руйнуванням ГСП ущільненого типу. Проаналізовано процес навантаження ГСП динамічними зусиллями на основі залежності інтенсивності стискання грунту і розміру деформованої зони від швидкості навантаження, тривалості імпульсу та фізико-механічних властивостей оброблюваного середовища / масиву.

Ключові слова: хвилі, розвантаження, обробка, ущільнені ґрунти, сільське господарство.

Постановка проблеми

При аналізі процесу навантаження ГСП динамічними зусиллями (швидкісне різання зі сколоном, удар, віброудар, віброхвильове, гідроімпульсне навантаження, тощо) видно, що інтенсивність стискання (по густині g або напрузі b) ґрунту і розмір l деформованої зони залежать від швидкості навантаження V_0, тривалості імпульсу t^* та фізико-механічних властивостей оброблюваного середовища / масиву.

При стискуванні у деформованій зоні R утворюються кінцеві залишкові деформації значної величини. Частина кінематичної енергії робочого органу (РО) машини переходить у енергію пружної деформації, яка при знятті ударного імпульсу звільняється і викликає рух стиснутої зони R - хвилю розвантаження. У цій зоні виникають розтягуючі напруження і, якщо вони досить значні і досягають межі міцності ГСП на розтяг (b_p), тоді зона руйнується. Слід відзначити, що у деяких ущільненнях ГСП відношення міцності при стисканні до її межі при розтягу досягає 4…5. Таким чином, доля ГСП, зруйнованого від розвантаження, може бути значною. Проте, на думку авторів даного дослідження, математична модель руху деформованої зони ГСП ущільненого після зняття імпульсу навантаження не розроблена.

Аналіз останніх досліджень

Динаміка руйнування ґрунтів при механізації земляних робіт детально розглянута у роботах [1-3], проте, для ГСП не проведена. Слід зазначити, що у даному дослідженні будуть використані підходи і результати вище згаданих робіт.

Мета досліджень

Метою даної роботи є обґрунтування математичної моделі розповсюдження хвиль розвантаження при обробці та руйнуванні ГСП ущільненого типу.

Результати досліджень

Розглянемо математичну модель руху деформації зони ущільненого ГСП після зняття імпульсу навантаження.

Рівняння цього руху можна записати у вигляді :

$$\frac{d^2u}{dt^2} = a^2 \cdot \frac{d^2}{\partial x^2} - 2 \cdot k_1 \cdot a^2 \cdot \frac{\partial y}{\partial x} \quad (1)$$

де: $a^2=E/g_1$; $k_1=f_{тертя} \cdot k/2$; E = const - модуль пружності області R, який визначається лінією розвантаження на діаграмі (рис.1);

g_1=const - густина ГСП у зоні R; $f_{тертя}$ - коефіцієнт тертя;

n(x,t)- швидкість хвилі у ущільненому ГСП; k- коефіцієнт бокового розширення.

Розглянемо випадок плоского руху та незначних змін густини ГСП у деформованій зоні. Початкові умови рівняння (1) мають вигляд:

$$E \cdot \frac{du}{dx} = \delta_0 \quad (2)$$

При t=0, 0≤x≤L;

$$\frac{du}{dx} = V_0 \qquad (3)$$

При t=0, 0≤x≤L;

де: δ_0 і V_0– відповідно напруга і швидкість ГСП у зоні R при t=0.

Границі умови для рівняння (1):

$$E \cdot \frac{du}{dx} = 0 \qquad (4)$$

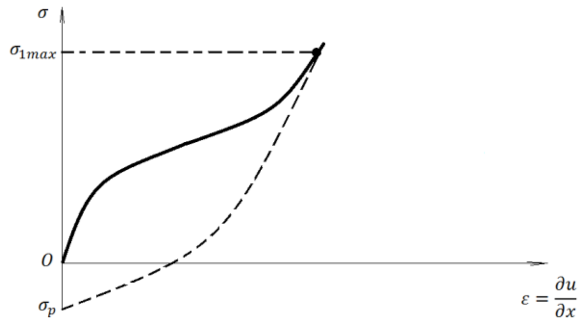

Рис. 1. Діаграма динамічного навантаження і розвантаження ущільненого ГСП.

Fig. 1. Diagram of the dynamic loading and unloading of compacted GSP.

Початок координат рухається на границі n області R₃ відносно спокійним ущільненим ГСП (рис. 2).

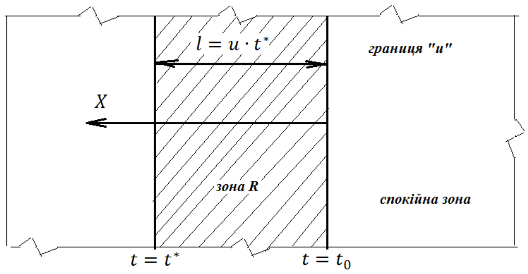

Рис. 2. Схема розвантаження грунтового масиву.

Fig. 2. Discharge pattern of a soil massif.

При x=L; t>0.

$$u(x,t) = 0 \qquad (5)$$

При x=0; t>0

Умова (4) відповідає площині робочого органу (РО), яка після зняття імпульсу залишається вільною. Зміст умови (5) зводиться до того, що деформації після зняття імпульсу не розповсюджується у зону спокою ГСП ущільненого.

Розв'язок рівняння (1) шукаємо методом Фур'є у вигляді :

$$u(x,t) = \emptyset(x) \cdot T(t) \qquad (6)$$

Введемо позначення:

$$\emptyset'(x) = \frac{d\emptyset(x)}{dx}, \emptyset"(x)\frac{d^2\emptyset(x)}{dx^2},$$

$$\dot{T}(t) = \frac{dT(t)}{dt}, \ddot{T}(t) = \frac{d^2T(t)}{dt^2}.$$

Підставляючи (6) у рівняння (1) матимемо:

$$\ddot{T}(t) \cdot \emptyset(x) = a^2 \cdot \emptyset''(x) \cdot T(t) - 2k_1 \cdot a^2 \cdot \emptyset'(x) \cdot T(t) \qquad (7)$$

Або (після почленного ділення всіх доданків у (7) на $\emptyset(x) \cdot T(t)$):

$$\frac{\ddot{T}(t)}{T(t)} = a^2 \cdot \frac{\emptyset''(x)}{\emptyset(x)} - 2k_1 \cdot a^2 \cdot \frac{\emptyset'(x)}{\emptyset(x)}. \qquad (8)$$

З (8) випливає, що:

$$\frac{1}{a^2} \cdot \frac{\ddot{T}(t)}{T(t)} = \frac{\emptyset''(x)}{\emptyset(x)} - 2k_1 \cdot \frac{\emptyset'(x)}{\emptyset(x)} = -\lambda, \lambda > 0. \qquad (9)$$

Розглянемо звичайне диференціальне рівняння для $\emptyset$(x):

$$\emptyset'' - 2 \cdot k_1 \cdot \emptyset' + \lambda\emptyset = 0. \qquad (10)$$

Корені відповідно до (10) характеристичного рівняння

$$s^2 - 2k_1 \cdot s + \lambda = 0. \qquad (11)$$

визначаються виразами :

$$s_1 = k_1\sqrt{k_1^2 - \lambda}; s_2 = k_1 + \sqrt{k_1^2 - \lambda}. \qquad (12)$$

Загальний розв'язок рівняння (10) має вигляд:

$$\emptyset(x) = C_1 \cdot \exp(s_1 \cdot x) + C_2 \cdot \exp(s_2 \cdot x). \qquad (13)$$

де $C_{1,2}$ – довільні сталі.

З умов (4) та (5) маємо :

$$\emptyset(0) = 0; \ \emptyset'(l) = 0. \qquad (14)$$

Звідси матимемо для $C_{1,2}$ систему рівнянь:

$$\begin{cases} C_1 + C_2 = 0; \\ s_1 \cdot \exp(s_1 l) \cdot C_1 + s_2 \cdot \exp(s_2 l) \cdot C_2 = 0. \end{cases} \qquad (15)$$

Для отримання нетривіальних розв'язків системи (15) слід виконати умови, за якої детермінант системи (15) дорівнює нулю, тобто:

$$exp[(s_2 - s_2) \cdot l] = \frac{s_1}{s_2}, \qquad (16)$$

або:

$$exp\left\{2\sqrt{k_1^2 - \lambda}\right\} = \frac{k_1 - \sqrt{k_1^2 - \lambda}}{k_1 + \sqrt{k_1^2 - \lambda}}. \qquad (17)$$

Рівняння (17) слугує як трансцендентне для визначення величини λ (власних чисел задачі).

Розглянемо можливі випадки розв'язку (17).

1. $k_1^2 = \lambda$, тоді (17) використовується як тотожність. У цьому випадку $s_1 = s_2 = k_1$ і розв'язок (10) має вид:

$$\emptyset(x) = (C_1 + C_2 \cdot x) \cdot \exp(k_1 \cdot x). \qquad (18)$$

2. $k_1^2 > \lambda$, тоді (17) умова не може бути виконаною, оскільки зліва у (17) стоїть величина більша 1, а зліва у (17) стоїть величина менша 1. Тобто у цьому випадку $C_1 = C_2 = 0$ й $\emptyset(x) \equiv 0$.

3. $k_1^2 < \lambda$, тоді можна подати

$$(k_1^2 - \lambda)^{1/2} = [(\lambda - k_1^2) \cdot (-1)]^{1/2}.$$

Звідси матимемо:

$$s_{1,2} = k_1 \pm i \cdot \gamma, i^2 = -1, \text{де } \gamma = \sqrt{\lambda - k_1^2}. \qquad (19)$$

У цьому випадку розв'язок (10) має вид:

$$\emptyset(x) = C_1 \cdot \exp(k_1 \cdot x) \cdot cos\gamma x + C_2 \cdot \cdot \exp(k_1 \cdot x) \cdot sin\gamma x. \qquad (20)$$

У подальшому розглядатимемо саме цей випадок.

З умов (14) одержимо, що, по-перше, $C_1 = 0$, а, по-друге, оскільки розшукується не нульове рішення, повинна бути виконана умова:

$$C_2 \neq 0, k_1 \cdot \sin(\gamma l) + \gamma \cdot \cos(\gamma l) = 0, \qquad (21)$$

або:

$$tg(\gamma l) = -\frac{\gamma}{k_1}. \qquad (22)$$

Отже, у даному випадку нетривіальним розв'язком рівняння (10) є функція:

$$\emptyset_n(x) = \exp(k_1 \cdot x) \cdot \sin(\gamma_n x), n = 1,2.., \qquad (23)$$

де $\gamma_n - n$-й корінь трансцендентного рівняння (22), рис.3. При цьому кожний n-й корінь (22) лежить у межах:

$$\frac{\pi}{2l} < \gamma_1 < \frac{3\pi}{2l};\ \frac{3\pi}{2l} < \gamma_2 < \frac{5\pi}{2l};\ \ldots\ldots;\ \frac{(2n-1)\pi}{2l} < \gamma_n < \frac{\pi\cdot(2n+1)}{2l};\ \ldots \qquad (24)$$

Розглянемо далі рівняння:

$$\ddot{T} + \lambda a^2 \cdot T = 0, \quad \lambda = \gamma^2 + k_1^2. \qquad (25)$$

Кожному кореню γ_n рівняння (22) відповідає розв'язок рівняння (25) виду:

$$T_n(t) = A_n \cdot cos\left[a \cdot \sqrt{\gamma_n^2 + k_1^2}\ \cdot t\right] + B_n \cdot sin\left[a \cdot \sqrt{\gamma_n^2 + k_1^2}\ \cdot t\right], n = 1,2, \ldots, \qquad (26)$$

де A_n, B_n- довільні сталі величини.

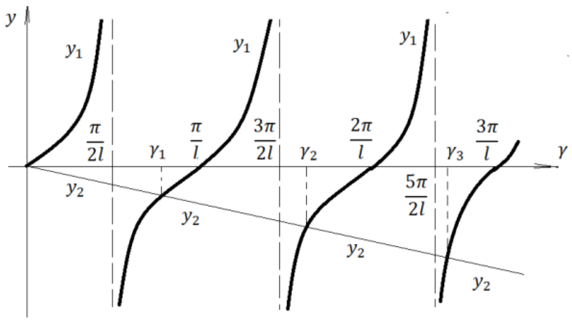

Рис. 3. Визначення коренів рівняння (22) графічним методом: $y_1 = tg(\gamma l)$;

Fig. 3. Determining roots of equation (22) a graphical method $y_1 = tg(\gamma l)$;

$$y_2 = -\frac{\gamma}{k_1}.$$

З (6) видно, що розв'язком рівняння (1) буде будь-який окремий розв'язок типу:

$$u_n(x,t) = \emptyset_n(x) \cdot T_n(t), \ n = 1,2,3, \ldots \qquad (27)$$

У зв'язку з лінійністю й однорідністю рівняння (1) сума окремих розв'язків:

$$u(x,t) = \exp(k_1 \cdot x) \cdot \sum_{n=1}^{\infty}\{A_n \cdot cos\left[a \cdot \sqrt{\gamma_n^2 + k_1^2} \cdot t\right] + B_n \cdot sin\left[a \cdot \sqrt{\gamma_n^2 + k_1^2} \cdot t\right]\} \cdot \sin(\gamma_n x), \qquad (28)$$

Також задовольняє цьому рівнянню і граничним умовам (4), (5). Визначимо тепер A_n і B_n так, щоб задовольнялися початкові умови (2) і (3). Умова (3) призводить до рівності:

$$a \cdot \exp(k_1 \cdot x) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \sqrt{\gamma_n^2 + k_1^2} \cdot sin(\gamma_n x) = V_0; \quad 0 \le x \le l. \qquad (29)$$

Для визначення коефіцієнтів B_n маємо співвідношення:

$$(\gamma_n^2 + k_1^2)^{1/2} \cdot a \cdot B_n \cdot \int_0^l \exp(2k_1 \cdot x) \cdot sin^2(\gamma_n . x)dx = V_0 \cdot \int_0^l \exp(\,k_1 \cdot x) \cdot \sin(\gamma_n x)\,dx, \qquad (30)$$

Звідси:

$$B_n = \frac{V_0 \cdot \int_0^l \exp(k_1 x) \cdot \sin(\gamma_n . x)dx}{\sqrt{\gamma_n^2 + k_1^2} \cdot a \cdot \int_0^l \exp(2k_1 x) \cdot sin^2(\gamma_n x)dx}. \qquad (31)$$

При $k_1 = 0$ вираз (31) набуває виду:

$$B_n = \frac{V_0 \cdot \int_0^l \sin(\gamma_n . x)dx}{\gamma_n \cdot a \cdot \int_0^l sin^2(\gamma_n x)dx} = \frac{V_0 \cdot 2}{\gamma_n^2 \cdot a} \cdot \frac{[1 - \cos(\gamma_n \cdot l]}{\left[l - \frac{\sin(2\gamma_n l)}{2\gamma_n}\right]} = \frac{8V_0 \cdot l}{a \cdot \pi^2 \cdot (2n-1)^2}, \ n = 1,2,3, \ldots. \qquad (32)$$

Співвідношення (32) для B_n виникає внаслідок:

$$k_1 = 0 \Leftrightarrow tg(\gamma_n l) = -\infty \Leftrightarrow \gamma_n = \frac{\pi \cdot (2n-1)}{2l}, \ n = 1,2,3, \ldots \qquad (33)$$

Функція (28) повинна задовольняти ще одну умову (2), що дає рівняння:

$$\frac{\delta_{10}}{E} = k_1 \cdot \exp(k_1 k) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \sin(\gamma_n x) + \exp(k_1 k) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \gamma_n \cdot \cos(\gamma_n x). \qquad (34)$$

Якщо позначити:

$$\psi(x) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \sin(\gamma_n x), \qquad (35)$$

Тоді рівняння (34) можна записати у вигляді:

$$\frac{\delta_{10}}{E} \cdot \exp(-k_1 k) = k_1 \cdot \psi(x) + \psi'(x), \qquad (36)$$

причому: $\psi(0) = 0$.

Розв'язком диференціального рівняння (36) буде:

$$\psi(x) = \frac{\delta_{10}}{E} \cdot x \cdot \exp(-k_1 k). \qquad (37)$$

Тому:

$$\exp(k_1 k) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \sin(\gamma_n x) = \frac{\delta_{10}}{E} \cdot x, \quad 0 \le x \le l. \qquad (38)$$

Звідси витікає:

$$A_n = \frac{\delta_{10}}{E} \cdot \frac{\int_0^l x \cdot \sin(\gamma_n x)dx}{\int_0^l sin^2(\gamma_n x)dx} = \frac{8 \cdot (-1)^{n+1} \cdot l \cdot \delta_{10}}{\pi^2 \cdot (2n-1)^2 \cdot E}, \qquad (40)$$

Оскільки виконуються співвідношення (33).

Таким чином, шуканим розв'язком (1) є функція (28), де коефіцієнтом A_n й B_n визначаються за формулами (31) та (39) (або за формулами (32) й (40) при $k_1 = 0$).

Числа $\gamma_n, n = 1,2,3, \ldots$.є коренями рівняння (22).

Далі розглянемо задачу виникнення зони розриву у ГСП. Умовою такого розриву є рівність:

$$E \cdot \frac{du}{dx} = -\delta_p, \qquad (41)$$

де δ_p- границя/ межа міцності ГСП на розтяг.

Рівняння (41), після підстановки у нього розв'язку $u(x,t)$ набуває вигляду:

$$E \cdot k_1 \cdot \exp(k_1 k) \cdot \sum_{n=1}^{\infty}(A_n \cdot cos\left\{a \cdot \sqrt{\gamma_n^2 + k_1^2} \cdot t\right\} + B_n \cdot sin\left\{a \cdot \sqrt{\gamma_n^2 + k_1^2} \cdot t\right\}) \cdot \sin(\gamma_n \cdot x) + E \cdot \exp(k_1 k) \cdot \sum_{n=1}^{\infty}(A_n \cdot cos\left\{a \cdot \sqrt{\gamma_n^2 + k_1^2} \cdot t\right\} + B_n \cdot sin\left\{a \cdot \sqrt{\gamma_n^2 + k_1^2} \cdot t\right\}) \cdot \gamma_n \cdot \cos(\gamma_n \cdot x) = -\delta_p. \qquad (42)$$

Введемо позначення:

$$\omega_n = a \cdot \sqrt{\gamma_n^2 + k_1^2}; \ \widetilde{a_n} = E \cdot \sqrt{A_n^2 + B_n^2}. \qquad (43)$$

Тоді рівність (42) можна спростити:

$$E \cdot k_1 \cdot \exp(k_1 k) \cdot \sum_{n=1}^{\infty}\left[\frac{\widetilde{a_n}}{E} \cdot cos\left\{a \cdot \sqrt{\gamma_n^2 + k_1^2} \cdot t\right\} \cdot \frac{A_n}{\sqrt{A_n^2 + B_n^2}} + \frac{\widetilde{a_n}}{E} \cdot sin\left\{a \cdot \sqrt{\gamma_n^2 + k_1^2} \cdot t\right\} \cdot \frac{B_n}{\sqrt{A_n^2 + B_n^2}}\right] \cdot \sin(\gamma_n \cdot x) + E \cdot \exp(k_1 k) \cdot \left[\frac{\widetilde{a_n}}{E} \cdot cos\left\{a \cdot \sqrt{\gamma_n^2 + k_1^2} \cdot t\right\} \cdot \frac{A_n}{\sqrt{A_n^2 + B_n^2}} + \frac{\widetilde{a_n}}{E} \cdot sin\left\{a \cdot \sqrt{\gamma_n^2 + k_1^2} \cdot t\right\} \cdot \frac{B_n}{\sqrt{A_n^2 + B_n^2}}\right] \cdot \gamma_n \cdot \cos(\gamma_n \cdot x) = -\delta_p. \qquad (44)$$

Після введення таких позначень:

$$sin\varphi_n = \frac{A_n}{\sqrt{A_n^2 + B_n^2}}; \quad cos\varphi_n = \frac{B_n}{\sqrt{A_n^2 + B_n^2}}; \quad a_n = E \cdot \sqrt{(A_n^2 + B_n^2) \cdot (k_1^2 + \gamma_n^2)}; \quad sin\psi_n = \frac{\gamma_n}{\sqrt{(k_1^2 + \gamma_n^2)}};$$

$$cos\psi_n = \frac{k_1}{\sqrt{(k_1^2+\gamma_n^2)}}, \quad (45)$$

(44) вираз спрощується до виду:

$$\exp(k_1 \cdot x) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \sin(\omega_n t + \gamma_n) \cdot \sin(\gamma_n x + \psi_n) = -\delta_p. \quad (46)$$

Рівняння (46) задає функцію $t = t(x)$, де $0 \leq x \leq l = u \cdot t^x$, у не явному виді.

Найближчий до точки $t = 0$ мінімум функції $t = t(x)$ досягається при $x = p_i,\ i = 1,2,\dots$, тоді площини $x = p_1, x = p_2, \dots, x = p_i, \dots$ є поверхнями, по яким відбувається розрив зони R на окремі частинки у моменти часу $t = t(p_i), i = 1,2,\dots,n,\widetilde{\dots,n} \in N$.

Знайдемо перше наближене до розв’язку поставленої задачі щодо відшукання $min\{t(x)\}, 0 \leq x \leq l$. З цією метою розглянемо рівняння (46) спрощеному вигляді й врахуємо лише перший член суми:

$$\exp(k_1 \cdot x) \cdot a_1 \cdot \sin(\omega_1 t + \gamma_1) \cdot \sin(\gamma_1 x + \psi_1) = -\delta_p. \quad (47)$$

З (47) маємо:

$$\sin(\omega_1 t + \gamma_1) = -\frac{\delta_p}{a_1 \cdot \exp(k_1 \cdot x) \cdot \sin(\gamma_1 x + \psi_1)}. \quad (48)$$

Для того щоб визначити момент часу $t = t(p_1)$ розриву зони R, спочатку знайдемо положення площини розриву $x = p_1$ з рівняння:

$$y'(x) = \{\exp(k_1 \cdot x) \cdot \sin(\gamma_1 x + \psi_1)\}'_x = 0 \quad (49)$$

Або:

$$tg(\gamma_1 x + \psi_1) = -\frac{\gamma_1}{k_1}, \quad 0 \leq x \leq l. \quad (50)$$

Розв’язок (50), що визначає p_1 має вид:

$$x = p_1 = \frac{1}{\gamma_1}\left[arctg\left\{-\frac{\gamma_1}{k_1}\right\} - \psi_1\right] = -\frac{1}{\gamma_1}\left[arctg\left\{\frac{\gamma_1}{k_1}\right\} + \psi_1\right], \quad (51)$$

Оскільки $(\gamma_1, k_1, \psi_1) > 0$, тоді для $0 < x \leq l$ слід взяти таке значення у правій частині (51), за якою $x > 0$, тобто :

$$x^* = p_1^* = \left\{\pi - \left[arctg\left\{\frac{\gamma_1}{k_1}\right\} + \psi_1\right]\right\} \cdot \frac{1}{\gamma_1}, \quad (52)$$

Причому, зрозуміло, що $\pi > arctg\left\{\frac{\gamma_1}{k_1}\right\} + \psi_1$.

Потім з рівняння (48) знаходимо:

$$t_1 = \frac{1}{\omega_1} \cdot \left\{\pi + arcsin\left[\frac{\delta_p \cdot (-1)}{a_1 \cdot \exp(k_1 \cdot p_1^*) \cdot \sin(\gamma_1 p_1^* + \psi_1)}\right] - \varphi_1\right\} = \frac{1}{\omega_1} \cdot \left\{\pi - arcsin\left[\frac{\delta_p}{a_1 \cdot \exp(k_1 \cdot p_1^*) \cdot \sin(\gamma_1 p_1^* + \psi_1)}\right] - \varphi_1\right\}. \quad (53)$$

З виразу (53) випливає, що збільшення тертя при відповідному збільшенні k_1 призводить до зростання t_1. При $k_1 \to \infty$ розриву зони R взагалі не існує.

Скінченні значення k_1, за яких відсутня зона розриву області R визначаються зі співвідношення:

$$k_1 \approx \frac{1}{l} \cdot ln\left\{\frac{\delta_p}{a_1 \cdot \sin(\gamma_1 l + \varphi_1)}\right\}. \quad (54)$$

Якщо $k_1 = 0$, тоді:

$$a_1 = \frac{4}{\pi} \cdot \sqrt{\delta_1^2 + E \cdot \rho_1 \cdot V_0^2}, \quad p_1^* = 0. \quad (55)$$

Якщо напруження у ГСП у початковий момент часу $(t_1 = 0)$, що є напруженням стискання грунту, буде задовольняти нерівності $\delta_1 > |\delta_p|$, тоді завжди існує момент t_1, при якому відбувається розрив у зоні R. Це твердження випливає з того що:

$$\left\{\frac{\delta_p}{a_1 \cdot exp[k_1 \cdot p_1^*] \cdot \sin(\gamma_1 p_1^* + \psi_1}\right\} \leq 1. \quad (56)$$

Висновки

1. Обґрунтовані фізико-механічна й математична моделі, які адекватно описують процеси розповсюдження хвиль розвантаження у ГСП при їх обробці/ руйнуванні робочими органами сільськогосподарських (ґрунтообробних) машин.

2. Отримані у даній роботі результати можуть у подальшому слугувати для уточнення й вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку оптимальних робочих органів ґрунтообробних машин сільськогосподарського призначення, взаємодіючих з оброблювальним середовищем як на стадіях їх проектування (конструювання), так і у причинах реальної експлуатації.

Список літератури

1. *Баладинский В. Л.* Динамика разрушения грунтов. Строительство и архитектура. 1990. Вып. 6. С. 93-98.
2. *Баладинский В. Л.* Механизация земляных работ. Киев. НИИСП госстроя Украины, 1991. 180 с.
3. *Баладінський В. Л.* Хвилі розвантаження при руйнуванні гірських порід. Горні, будівельні, дорожні та меліоративні машини. 1993. Вип. 48. С. 17-25.

References

1. *Baladinsky V. L.* (1990). Dynamics of soil destruction. Gouvia High Schools. Construction and architecture. Vol. 6. 93-98.
2. *Baladinsky V. L.* (1991). Mechanization of excavation. Kyiv. NIISP state structure of Ukraine. 180.
3. *Baladinsky V. L.* (1993). Waves of unloading at destruction of rocks. Mining, construction, road and reclamation machines. Issue 48. 17-25.

ВОЛНЫ РАЗГРУЗКИ ПРИ ОБРАБОТКЕ УПЛОТНЁННЫХ ПОЧВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Ю. В. Човнюк, Ю. О. Гуменюк, И. Н. Сивак

Аннотация. Рассмотрены условия разрушения при обработке уплотненных почв сельскохозяйственного назначения (ПСН) при их быстрой разгрузке. Рассмотрено напряженно-деформированное состояние массива ПСН после его скола, удара, ударно-вибрационного или иного импульса. Определены продолжительность, положение поверхности и деформации разрыва ПСН, влияние на процесс трения и границы зоны разрушения почвы. Обоснованные физико-механическая и математическая модели, адекватно описывающие процессы распространения волн разгрузки в ПСН при их обработке / разрушении рабочими органами сельскохозяйственных (почвообрабатывающих) машин. Рассмотрена динамика разрушения почв при механизации земляных работ с разрушением ПСН уплотненного типа. Проанализированы процесс нагрузки ГСП динамическими усилиями на основе зависимости интенсивности сжатия почвы и размера деформированной зоны от скорости нагрузки, длительности импульса и физико-механических свойств обрабатываемой среды / массива.

Ключевые слова: волны, разгрузка, обработка, уплотненные почвы, сельское хозяйство.

UNLOADING WAVES DURING THE PROCESSING OF COMPACTED SOILS OF AGRICULTURAL PURPOSE

Yu. V. Chovnyuk, Yu. O. Gumenyuk, I. M. Sivak

Abstract. The conditions of destruction during processing of compacted soils of agricultural purpose (SAP) at their fast unloading are considered. The stress-strain state of the SAP array after its chipping, shock, shock-vibration or other impulse is considered. The duration, position of the surface and deformation of the SAP rupture, influence on the process of friction and boundary of the zone of destruction of soil are determined. Physical-mechanical and mathematical models that adequately describe the processes of propagation of unloading waves in SAP during their processing / destruction by working bodies of agricultural (soil-cultivating) machines are substantiated. The dynamics of soil destruction during mechanization of earthworks with the destruction of compacted SAP is considered. The process of SAP loading by dynamic efforts is analyzed on the basis of the dependence of the compression intensity of the soil and the size of the deformed zone on the loading rate, pulse duration and physico-mechanical properties of the treated medium / array.

Key words: waves, unloading, processing, compacted soils, agriculture.

Ю. В. Човнюк ORCID 0000-0003-1889-0876.
Ю. О. Гуменюк ORCID 0000-0001-8203-5749.
І. М. Сівак ORCID 0000-0002-6297-587X.