

## АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ СТРУКТУРНОГО АГРЕГАТУ ҐРУНТУ РОБОЧОЮ ПОВЕРХНЕЮ ГЛИБОКОРОЗПУШУВАЧА

Дворник Андрій Віталійович

кандидат технічних наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0001-8242-4250

a.dvornyk@ukr.net

*Визначено умови руху структурного агрегату ґрунту, що визначає границю між двома режимами роботи глибокорозпушувача. Якщо швидкість руху ґрунту по поверхні глибокорозпушувача на рівні глибини обробітку менше нуля, то глибокорозпушувач працює в режимі розпушування. Кут між дотичною до напрямної у початку координат та горизонталлю – кут підйому  $\alpha_0$  вибирається так, щоб пластичні деформації не потрапляли у дно борозни і не ущільнювали її. При цьому математична модель обробітку ґрунту складена з урахуванням допущень: рух робочого органу є поступальним, коли всі точки глибокорозпушувача мають тотожні швидкості і прискорення; глибокорозпушувач рухається з деякою середньою усталеною швидкістю, тобто в першому наближенні рівномірно; згідно експериментальних досліджень співударення ґрунтових мас з робочою поверхнею глибокорозпушувача під час обробітку є непружними з нехтовно малим коефіцієнтом відновлення; лівосторонню систему координат, пов'язану з серединою робочого леза глибокорозпушувача, відносно якої досліджується рух ґрунту і яка поступально і рівномірно рухається разом з машинно-тракторним агрегатом під час усталеного процесу смугового обробітку, вважаємо інерційною системою відліку з високим ступенем точності; сили взаємодії окремого структурного агрегату ґрунту, рух якого досліджується, з іншими структурними агрегатами ґрунту потоку ґрунту вважаються у першому наближенні зрівноваженими, а тому не враховуються. В статті обґрунтовано, що рух структурного агрегату ґрунту не залежить від рушійних сил енергетичного засобу, а переходить у самостійний рух під дією сили ваги, сили реакції поверхні з врахуванням сили тертя структурного агрегату ґрунту по металевій поверхні, які заважають вільному руху. Для визначення величини швидкості в залежності від кута установки леза до горизонту скористались загальновідомим рівнянням рівноваги структурного агрегату ґрунту на поверхні глибокорозпушувача. Автором складено систему нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку, яка відображає рух структурного агрегату ґрунту вздовж параболічної циліндричної поверхні глибокорозпушувача. Враховуючи, що нормальна складова реакції перпендикулярна до осі  $Oy$ , зроблено висновок, що всі прикладені сили розміщені в центральній площині симетрії глибокорозпушувачу, а тому вектори швидкості і прискорення структурного агрегату ґрунту не проектується на вісь  $Oy$ .*

**Ключові слова:** структурний агрегат ґрунту, глибокорозпушувач, робоча поверхня, рух по поверхні.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.4.4>

**Постановка проблеми.** Розгляд питань землеробської механіки набув грандіозних результатів із коლოსальною кількістю наукових праць присвячених побудові відповідних моделей руху ґрунту (Hrynkiv et al., 2020) та структурних агрегатів ґрунту (Rogovskii et al., 2019). Проте аналіз даних стосовно руху ґрунту робочою поверхнею глибокорозпушувача для забезпечення якості обробітку ґрунту з одночасним зменшенням енергозатрат залишається актуальним для подальшого дослідження.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним з можливих варіантів робочої поверхні глибокорозпушувача може бути циліндрична поверхня (Hossain et al., 2014), твірні якої паралельні осі  $Oy$  (Foley et al., 2012), тобто горизонтальні (Rogovskii et al., 2020), але розміщені за законом параболи (Nazarenko et al., 2021).

Рівняння параболічної поверхні в лівій прямокутній системі декартових координат  $Oxz$  коли  $y=0$ , має вигляд:

$$z = \sqrt{L} - \sqrt{L-x}, \quad (1)$$

де  $L$  – довжина робочої поверхні вздовж осі  $Ox$ .

Для обґрунтування розглянуто виведення рівняння параболи (1) згідно рис. 1. Із параболи, яка розміщена симетрично відносно осі  $Ox$   $z^2 = L - x; \Rightarrow z = \pm\sqrt{L-x}$ ;

при  $x=0: z = \pm\sqrt{L}$ ; при  $x=L: z=0$ . Переміщену вісь симетрії параболи паралельно догори на величину  $\sqrt{L}$   $(z - \sqrt{L})^2 = L - x; z - \sqrt{L} = \pm\sqrt{L-x}; \Rightarrow z = \sqrt{L} \pm \sqrt{L-x}$ . Потрібна вітка параболи має вигляд:  $z = \sqrt{L} - \sqrt{L-x}$  (Pöhltz et al., 2018), при  $x=0: \Rightarrow z = \sqrt{L} - \sqrt{L} = 0$  (Rogovskii et al., 2021); при  $x=L: \Rightarrow z = \sqrt{L}$  (Vaitauskienė et al., 2017). Таким чином (Charmen et al., 2015), вісь симетрії параболи зміщена догори паралельно осі  $Ox$  (Lekavičienė et al., 2019) і проходить через вершину параболи точку  $C$  з координатами  $C(L; \sqrt{L})$  (Yinyana et al., 2019). Отже, вибираємо для досліджуваної поверхні глибокорозпушувача нижню вітку параболи, що розміщується від початку координат  $O$  до її вершини в точці  $C$  за формулою (1).

Рух структурного агрегату ґрунту розглядається як невільний рух (Rogovskii et al., 2021), оскільки фізично спрямовується і обмежується площиною, з глином або параболічною поверхнею, за якою вимушена рухатись ця частина ґрунту (Celik, 2013). Виразивши рівняннями в'язей у вигляді функціональної залежності від координат  $f(x, y, z) = 0$ , поверхні або лінії, по якій рухається структурний агрегат ґрунту (Rogovskii et al., 2022). Коор-

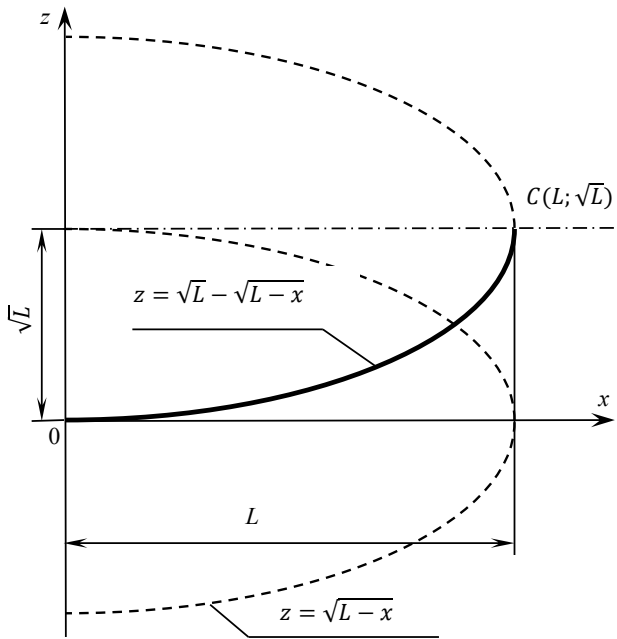


Рис. 1. Схема до виведення рівняння параболи

динати структурного агрегату ґрунту мають задовольняти цьому рівнянню, коли рух шорсткою поверхнею з тертям (Romaniuk et al., 2018). Повну реакцію шорсткої поверхні розкладемо на дві взаємно перпендикулярні складові вздовж головної нормалі в даній точці кривої  $N$  і вздовж дотичної до поверхні, за якою рухається структурний агрегат ґрунту (Rogovskii, 2019). Крім векторів нормальної складової реакції  $\vec{N}$  і сили тертя  $\vec{F}_{TP}$  на точку діє і вертикальна сила ваги  $G$  (Н), як добуток маси  $m$  на прискорення вільного падіння  $g$ ,  $G = mg$ , (Н).

**Метою досліджень** є дослідження руху ґрунту робочою поверхнею глибокорозпушувача.

**Результати досліджень.** Для вивчення невідомого руху структурного агрегату ґрунту по заданій нерухомій кривій або кривій, що рухається поступально і рівномірно, можна використовувати натуральний тригранник  $M\tau n b$ , три взаємо перпендикулярні осі якого розміщуються по дотичній до кривої в даній точці по головній нормалі і по бінормалі, а початок координат – в точці  $M$ , рух якої досліджується (рис. 2:  $M_i$  –  $n$ -ий структурний агрегат ґрунту;  $k, \bar{i}$  – осі руху  $n$ -го структурного агрегату ґрунту;  $O$  – початок координат по відношенню до глибокорозпушувача;  $R$  – умовний радіус траєкторії структурного агрегату ґрунту, м;  $\vec{G}$  – сила тяжіння, що діє на  $n$ -ий структурний агрегат ґрунту, Н;  $\vec{F}_{TP}$  – сила тертя, що діє на  $n$ -ий структурний агрегат ґрунту при русі робочою поверхнею, Н;  $\vec{N}$  – рівнодіюча сила, що діє на  $n$ -ий структурний агрегат ґрунту  $n$ -ої частинки ґрунту, Н;  $\phi$  – кут відхилення  $n$ -ого структурного агрегату ґрунту від початку руху;  $\bar{v}$  – швидкість руху  $n$ -ого структурного агрегату ґрунту у відповідній точці, м/с).

Оскільки на бінормаль не проєктуються вектори сил і кінематичних параметрів, то вона на рисунку не показана. Точка додатного відліку переміщення  $O$  розміщена на початку руху на дні борозни, вектор початко-

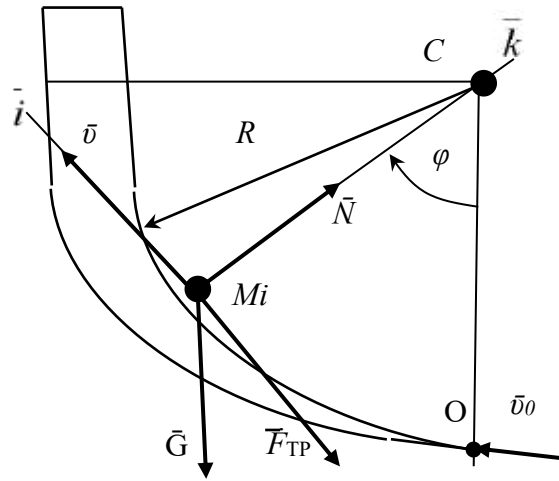


Рис. 2. Спрощена розрахунково-силова схема дослідження руху структурного агрегату ґрунту  $M_i$  робочою поверхнею глибокорозпушувача в натуральних осях координат

вої швидкості  $\bar{v}_0$  горизонтальний. Координатні осі  $\tau, n$  рухаються разом з структурним агрегатом ґрунту і змінюють своє положення згідно характеру кривої. Головна нормаль  $n$  спрямована до точки  $C$ , на якій розміщений вектор сили нормальної реакції  $\vec{N}$ . Вздовж дотичної  $\tau$  розміщені вектор поточної швидкості  $\vec{v}$  і протилежний йому вектор сили Кулонового тертя  $\vec{F}_{TP}$ . До точки прикладений також вектор сили ваги  $\vec{G}$ .

Складемо диференціальне рівняння руху невідомого структурного агрегату ґрунту у векторній формі відносно криволінійної поверхні глибокорозпушувача  $m\vec{a} = \vec{G} + \vec{N} + \vec{F}_{TP}$ . Спроекуємо вектори рівняння на осі натуральної системи координат, використавши кут  $\phi$ , який координує положення точки. На початку руху при  $t = t_0$  цей кут  $\phi_0 = 0$ , а початкова швидкість дорівнювала  $\bar{v}_0$ . Отримаємо наступні два скалярних рівняння в проєкціях на натуральні осі  $\tau, n$ :

$$m \frac{dv}{dt} = -G \sin \phi - F_{TP}. \quad (2)$$

$$m \frac{v^2}{R} = N - G \cos \phi. \quad (3)$$

де  $m$  – маса структурного агрегату ґрунту, кг;  $\phi$  – поточний кут, рад;  $R$  – радіус кола, м.

Підставляємо сталу інтегрування  $C_1$  в загальний розв'язок неоднорідного диференціального рівняння  $i$ , враховуючи, що  $v^2 = \dot{\phi}^2 R^2$ , остаточно отримуємо шуканий закон зміни квадрата швидкості структурного агрегату ґрунту від кута  $\phi$ , який визначає її положення:

$$v^2 = \left( v_0^2 - \frac{2gR(1-2f^2)}{1+4f^2} \right) e^{-2\phi} - \frac{6gRf}{1+4f^2} \sin \phi + \frac{2gR(1-2f^2)}{1+4f^2} \cos \phi. \quad (4)$$

Визначимо величину сили нормальної реакції  $N$ , оскільки швидкість в будь-який момент руху тепер відома:

$$N = m \left[ \left( v_0^2 - \frac{2g(1-2f^2)}{(1+4f^2)} \right) e^{-2\phi} - \frac{6gf}{(1+4f^2)} \sin\phi + \frac{2g(1-2f^2)}{(1+4f^2)} \cos\phi \right] + mg \cos\phi. \quad (5)$$

Математична модель обробітку ґрунту складена з урахуванням допущень:

– рух робочого органу є поступальним, коли всі точки глибокорозпушувача мають тотожні швидкості і прискорення;

– глибокорозпушувач рухається з деякою середньою усталеною швидкістю, тобто в першому наближенні рівномірно;

– згідно експериментальних досліджень співвідношення ґрунтових мас з робочою поверхнею глибокорозпушувача під час обробітку є непружними з нехтовно малим коефіцієнтом відновлення;

– лівосторонню систему координат, пов'язану з серединою робочого леза глибокорозпушувача, відносно якої досліджується рух ґрунту і яка поступально і рівномірно рухається разом з машинно-тракторним агрегатом під час усталеного процесу смугового обробітку, вважаємо інерційною системою відліку з високим ступенем точності;

– сили взаємодії окремого структурного агрегату ґрунту, рух якого досліджується, з іншими структурними агрегатами ґрунту потоку ґрунту вважаються у першому наближенні зрівноваженими, а тому не враховуються.

Розглянемо далі рух структурного агрегату ґрунту вздовж робочої поверхні глибокорозпушувача, яка складається із плоского клину 1 довжиною  $l$  (рис. 3) і циліндричної параболічної поверхні 2 з параметром  $L$ , твірні якої горизонтальні і паралельні осі  $Oy$ . Початок лівої прямокутної декартової системи координат (точка  $O$ ) розмістимо посередині ріжучої кромки леза глибокорозпушувача. Вісь  $Ox$  направимо горизонтально проти напрямку руху глибокорозпушувача, вісь  $Oz$  – вертикально вгору, а вісь  $Oy$  – перпендикулярно до осі  $Ox$  і в той же час паралельно твірній поверхні прямого кругового циліндра 2, яка з'єднується з поверхнею плоского клину 1. Структурний агрегат ґрунту  $M$  в довільному положенні під час руху по площині плоского клину 1, в подальшому переходить на циліндричну поверхню 2.

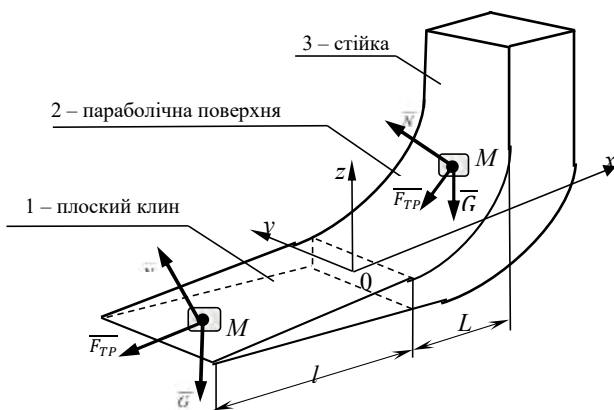


Рис. 3. Розрахункова схема взаємодії структурного агрегату ґрунту з поверхнями плоского клину і параболічною поверхнею та стійки глибокорозпушувача

У зв'язку з усталеним рухом енергетичного засобу припустимо, що початкова швидкість руху структурного агрегату ґрунту на першому етапі дорівнює поступальній швидкості машини  $v_0 = v_{ox}$ , але направлена вздовж осі  $Ox$ . Можна вважати, що проекції початкової швидкості на дві інші осі координат  $z$  та  $y$  дорівнюють нулю, звідки  $v_{ox} = \dot{x}_0 = v_0$ . Зберігається лише дотична складова вектору швидкості, яка стає початковою лінійною швидкістю структурного агрегату ґрунту, а нормальна складова є нехтовно малою. Тому під час руху структурного агрегату ґрунту по плоскому клину початкові умови руху мають вигляд:

$$t = t_0 = 0; \quad x = x_0(t_0) = 0; \quad y = y_0(t_0) = 0; \quad z = z_0(t_0) = 0;$$

$$v_x = \dot{x}_0(t_0) = \frac{v_0 M}{C}; \quad v_y = \dot{y}_0(t_0) = v_{0y} = 0;$$

$$v_z = \dot{z}_0(t_0) = v_{0z} = 0.$$

Рух структурного агрегату ґрунту не залежить від рушійних сил енергетичного засобу, а переходить у самостійний рух під дією сили ваги, сили реакції поверхні з врахуванням сили тертя структурного агрегату ґрунту по металевій поверхні, які заважають вільному руху.

Таким чином, диференціальне рівняння руху структурного агрегату ґрунту відносно поверхні глибокорозпушувача у векторній формі згідно основного закону динаміки для невідомої матеріальної точки матиме вигляд  $m\vec{a} = \vec{G} + \vec{N} + \vec{F}_{TP}$ . Зазначимо, що напрям вектора  $\vec{N}$  нормальної реакції, як сила дії поверхні на структурний агрегат ґрунту, формує конфігурація робочої поверхні, тобто її геометрія. Рівняння цієї поверхні є рівнянням в'язі під час руху по ній структурного агрегату ґрунту, від якого залежить відносний рух часток структурного агрегату ґрунту. Враховуючи векторне рівняння і рівняння в'язі  $f(x, y, z) = kx - z = 0; \quad y = 0$ , з врахуванням формули П. М. Василенка, складемо диференціальні рівняння руху структурного агрегату ґрунту плоским клином в координатній формі проєкцій на осі прямокутної декартової системи координат  $Oxyz$ :

$$m\ddot{x} = N \cos(\vec{i}, \vec{N}) + F_{TP} \cos(\vec{i}, \vec{v}),$$

$$m\ddot{y} = N \cos(\vec{j}, \vec{N}) + F_{TP} \cos(\vec{j}, \vec{v}),$$

$$m\ddot{z} = N \cos(\vec{k}, \vec{N}) + F_{TP} \cos(\vec{k}, \vec{v}) - G,$$

$$f(x, y, z) = \sqrt{L} - \sqrt{L-x} - z = 0; \quad (6)$$

де  $\vec{v}$  – вектор швидкості структурного агрегату ґрунту вздовж поверхні робочого органу,  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  – орти або одиничні базисні вектори прийнятої лівої прямокутної декартової системи координат  $Oxyz$  (рис. 1);  $k = tg \frac{H}{L}$ , – кутовий коефіцієнт пропорційності,  $H$  – кінцева висота клину,  $m$ ,  $L$  – довжина клину по горизонталі у запропонованій конструкції, де останнє рівняння є рівнянням в'язі (6) у неявній формі.

Для визначення напрямних косинусів візьмемо частинні похідні від рівняння в'язі у неявній формі:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{1}{2\sqrt{L-x}}; \quad \frac{\partial f}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial f}{\partial z} = -1. \quad (7)$$

Частинна похідна  $\frac{\partial f}{\partial y}$  від функції в'язі  $f(x, y, z)$

дорівнює нулю, оскільки ця функція не залежить від координати  $y$ . Визначимо градієнт функції в'язі  $f(x, y, z)$

$$\Delta f = \sqrt{\frac{1}{4(L-x)} + 1} = \sqrt{\frac{1+4(L-x)}{4(L-x)}}. \quad (8)$$

Отримаємо величини напрямних косинусів:

$$\cos(\bar{i}, \bar{N}) = \frac{1}{\sqrt{1+4(L-x)}}, \cos(\bar{j}, \bar{N}) = 0, \cos(\bar{k}, \bar{N}) = -\sqrt{\frac{4(L-x)}{1+4(L-x)}}. \quad (9)$$

Напрямний косинус між віссю  $Oy$  та нормальною складовою реакції  $\bar{N}$ , як можна побачити, дорівнює нулю, тому кут між ними  $(\bar{j}, \bar{N}) = \frac{\pi}{2}$ . Визначимо далі напрямні косинуси між осями координат та вектором швидкості  $\bar{v}$ , вздовж якого спрямована сила тертя ковзання, але протилежно за напрямом мають такі значення:

$$\begin{aligned} \cos(\bar{i}, \bar{v}) &= -\frac{\dot{x}}{v} = -\frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}}; \\ \cos(\bar{j}, \bar{v}) &= -\frac{\dot{y}}{v} = -\frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}}; \\ \cos(\bar{k}, \bar{v}) &= -\frac{\dot{z}}{v} = -\frac{\dot{z}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Підставляючи вирази у систему диференціальних рівнянь (7), отримаємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= \frac{N}{\sqrt{1+4(L-x)}} - fN \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}}, \\ m\ddot{y} &= -fN \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}}, \\ m\ddot{z} &= -N \sqrt{\frac{4(L-x)}{1+4(L-x)}} - fN \frac{\dot{z}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}} - mg, \\ z &= \sqrt{L} - \sqrt{L-x}; \quad y = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Система диференціальних рівнянь (11) є системою нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку, яка відображає рух структурного агрегату ґрунту вздовж параболічної циліндричної поверхні глибокорозпушувача. Враховуючи, що нормальна складова реакції  $\bar{N}$  перпендикулярна до осі  $Oy$ , можна зробити висновок, що всі прикладені сили розміщені в центральній площині симетрії глибокорозпушувача, а тому вважаємо, що вектори швидкості і прискорення структурного агрегату ґрунту не проєктуються на вісь  $Oy$ :  $\dot{y} = 0$ ;  $\ddot{y} = 0$ . Тоді система рівнянь (11) набуває такого вигляду:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= \frac{N}{\sqrt{1+4(L-x)}} - fN \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{z}^2}}, \\ m\ddot{z} &= -N \sqrt{\frac{4(L-x)}{1+4(L-x)}} - fN \frac{\dot{z}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{z}^2}} - mg, \end{aligned}$$

$$z = \sqrt{L} - \sqrt{L-x}; \quad y = 0. \quad (12)$$

Початкові умови для системи диференціальних рівнянь мають наступний вигляд:  $t = t_0 = 0$ :  $x = x_0 = 0$ ;  $z = z_0 = 0$ ;  $\dot{x} = \dot{x}_0 = v_0$ ;  $\dot{z} = \dot{z}_0 = 0$ . Прямокутну декартову систему координат  $Oxyz$  розміщуємо на початку розташування параболічної поверхні з початком координат  $O$  на площі різання.

На структурний агрегат ґрунту діють сила ваги  $\bar{G}$ , сила нормальної реакції  $\bar{N}$  і сила Кулонового тертя  $\bar{F}_{TP}$ . Рівняння плоскої поверхні клину, твірні якого паралельні осі  $Oy$ , виглядає  $z = kx$ ;  $y = 0$ , де  $k = tg \frac{H}{l}$  – коефіцієнт пропорційності,  $H$  – кінцева висота клину,  $l$  – довжина клину по горизонталі у запропонованій конструкції. У неявній формі функція в'язі має вираз  $f(x, y, z) = kx - z = 0$ ;  $y = 0$ .

Знайдемо частинні похідні та модуль градієнта функції в'язі:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = k; \quad \frac{\partial f}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial f}{\partial z} = -1; \quad \Delta f = \sqrt{k^2 + 1}. \quad (13)$$

Напрямні косинуси векторів сили тертя  $\bar{F}_{TP}$  і сили нормальної реакції  $\bar{N}$  мають такі вирази:

$$\begin{aligned} \cos(\bar{i}, \bar{v}) &= -\frac{\dot{x}}{v} = -\frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}}; \\ \cos(\bar{j}, \bar{v}) &= -\frac{\dot{y}}{v} = -\frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}}; \\ \cos(\bar{k}, \bar{v}) &= -\frac{\dot{z}}{v} = -\frac{\dot{z}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}}. \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \cos(\bar{i}, \bar{N}) &= \frac{k}{\sqrt{k^2 + 1}}; \quad \cos(\bar{j}, \bar{N}) = 0; \\ \cos(\bar{k}, \bar{N}) &= -\frac{1}{\sqrt{k^2 + 1}}. \end{aligned} \quad (15)$$

За врахуванням виразів (14), (15) та перпендикулярності векторів прикладених сил осі  $Oy$  складемо остаточно систему диференціальних рівнянь руху матеріальної точки у вигляді структурного агрегату ґрунту в проєкціях на осі декартової системи координат:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= N \frac{k}{\sqrt{k^2 + 1}} - fN \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{z}^2}}, \\ m\ddot{z} &= -N \frac{1}{\sqrt{k^2 + 1}} - fN \frac{\dot{z}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{z}^2}} - mg, \\ z &= kx; \quad y = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Початкові умови для розв'язання системи диференціальних рівнянь з визначенням довільних сталих інтегрування мають вигляд  $t = t_0 = 0$ :  $x = x_0(t_0) = -l$ ;  $y = \dot{y}_0 = 0$ ;  $z = z_0 = 0$ ;  $\dot{x} = \dot{x}_0(t_0) = v_0$ ;  $\dot{z} = \dot{z}_0 = 0$ .

Для визначення величини швидкості в залежності від кута установки леза до горизонту скористаємося загаль-

новідомим рівнянням рівноваги структурного агрегату ґрунту на поверхні глибокорозпушувача:

$$m \frac{dV_R}{dt} = -f_1 Q - f_1 P \cos \alpha - P \sin \alpha, \quad (17)$$

де  $m$  – маса структурного агрегату ґрунту на поверхні долота, кг;  $V_R$  – швидкість руху структурного агрегату ґрунту на поверхні глибокорозпушувача, м/с;  $t$  – час руху структурного агрегату ґрунту на поверхні глибокорозпушувача, с;  $f_1$  – коефіцієнт тертя ґрунту по матеріалу поверхні глибокорозпушувача, відносних од.;  $Q$  – відцентрова сила інерції, що діє на структурний агрегат ґрунту при русі по поверхні глибокорозпушувача, Н;  $P$  – вага структурного агрегату ґрунту, Н;  $\alpha$  – кут установки леза до горизонту, град.

Увівши загальновідомі значення відцентрової сили інерції та ваги структурного агрегату ґрунту, які становлять:

$$m \frac{dV_R}{dt} = -f_1 m \frac{V_R^2}{R} - f_1 mg \cos \alpha - mg \sin \alpha \quad (18)$$

де  $g$  – прискорення сили тяжіння, м/с<sup>2</sup>;  $R$  – радіус напрямної поверхні, м.

Відповідно рішення даного рівняння:

$$V_R = uv; V'_R = u'v + v'u;$$

$$u'v + v'u + f_1 uv = -\frac{Rg}{uv} (f_1 \cos \alpha + \sin \alpha);$$

$$u'v + u(v' + f_1 v) = -\frac{Rg}{uv} (f_1 \cos \alpha + \sin \alpha);$$

$$v' + f_1 v = 0; \frac{dv}{d\alpha} = -f_1 v; \frac{dv}{v} = -f_1 d\alpha; \ln v = -f_1 \alpha; v = \exp(-f_1 \alpha);$$

$$uu' \exp(-2f_1 \alpha) = -Rg(f_1 \cos \alpha + \sin \alpha);$$

$$u \frac{du}{d\alpha} = -Rg \exp(2f_1 \alpha) (f_1 \cos \alpha + \sin \alpha);$$

$$\frac{u^2}{2} = -Rg \left[ f_1 \exp(2f_1 \alpha) \cos \alpha d\alpha + \exp(2f_1 \alpha) \sin \alpha d\alpha \right];$$

$$\frac{u^2}{2} = -Rg \left[ f_1 \frac{\exp(2f_1 \alpha)}{4f_1^2 + 1} (2f_1 \cos \alpha + \sin \alpha) + \frac{\exp(2f_1 \alpha)}{4f_1^2 + 1} (2f_1 \sin \alpha - \cos \alpha) \right];$$

$$\frac{u^2}{2} = -\frac{Rg \exp(2f_1 \alpha)}{4f_1^2 + 1} [f_1 (2f_1 \cos \alpha + \sin \alpha) + 2f_1 \sin \alpha - \cos \alpha];$$

$$u^2 = -\frac{2Rg \exp(2f_1 \alpha)}{4f_1^2 + 1} [f_1 (2f_1 \cos \alpha + \sin \alpha) + 2f_1 \sin \alpha - \cos \alpha];$$

$$u^2 = -\frac{2Rg \exp(2f_1 \alpha_0)}{4f_1^2 + 1} [(2f_1^2 - 1) \cos \alpha + 3f_1 \sin \alpha] + C;$$

$$V_R^2 = \left( -\frac{2Rg \exp(2f_1 \alpha_0)}{4f_1^2 + 1} [(2f_1^2 - 1) \cos \alpha + 3f_1 \sin \alpha] + C \right) \exp(-2f_1 \alpha)$$

Постійну інтегрування визначимо, скориставшись умовою, що для початкового моменту часу  $t=0$  швидкість руху структурного агрегату ґрунту на поверхні плоского клину дорівнює швидкості руху глибокорозпушувача  $V$ , а кут установки клину до горизонту дорівнює початковому куту  $\alpha_0$ . В цьому випадку:

$$C = V^2 \exp(2f_1 \alpha_0) + \frac{2Rg \exp(2f_1 \alpha_0)}{4f_1^2 + 1} [(2f_1^2 - 1) \cos \alpha + 3f_1 \sin \alpha_0]. \quad (19)$$

Підставляючи одержане значення постійної інтегрування, отримаємо наступний вираз для визначення швидкості руху ґрунту у функції кута підйому:

$$V_R^2 = -\frac{2Rg}{4f_1^2 + 1} [(2f_1^2 - 1) \cos \alpha + 3f_1 \sin \alpha] + V^2 \exp[2f_1 (\alpha_0 - \alpha)] + \frac{2Rg}{4f_1^2 + 1} [(2f_1^2 - 1) \cos \alpha_0 + 3f_1 \sin \alpha_0] \exp[2f_1 (\alpha_0 - \alpha)]. \quad (20)$$

Після перетворення одержимо:

$$V_R^2 = \left( V^2 - \frac{2Rg \exp[2f_1 (\alpha - \alpha_0)]}{4f_1^2 + 1} [(2f_1^2 - 1) \cos \alpha_0 + 3f_1 \sin \alpha_0] \right) + \frac{2Rg}{4f_1^2 + 1} [(2f_1^2 - 1) \cos \alpha_0 + 3f_1 \sin \alpha_0] \exp[2f_1 (\alpha_0 - \alpha)]$$

$$V_R^2 = \left[ V^2 - \frac{2Rg \exp[2f_1 (\alpha - \alpha_0)]}{4f_1^2 + 1} \sqrt{4f_1^4 + 5f_1^2 + 1} \sin \left( \alpha + \arctg \frac{2f_1^2 - 1}{3f_1} \right) + \frac{2Rg \sqrt{4f_1^4 + 5f_1^2 + 1}}{4f_1^2 + 1} \sin \left( \alpha_0 + \arctg \frac{2f_1^2 - 1}{3f_1} \right) \right] \exp[2f_1 (\alpha_0 - \alpha)]$$

$$V_R^2 = \left\{ V^2 - \frac{2Rg \sqrt{4f_1^4 + 5f_1^2 + 1}}{4f_1^2 + 1} \left[ \exp[2f_1 (\alpha_0 - \alpha)] \sin \left( \alpha + \arctg \frac{2f_1^2 - 1}{3f_1} \right) - \sin \left( \alpha_0 + \arctg \frac{2f_1^2 - 1}{3f_1} \right) \right] \right\} \exp[2f_1 (\alpha_0 - \alpha)]$$

$$V_R = \left\{ V^2 \exp[2f_1 (\alpha_0 - \alpha)] - \frac{2Rg \sqrt{4f_1^4 + 5f_1^2 + 1}}{4f_1^2 + 1} \left[ \sin \left( \alpha + \arctg \frac{2f_1^2 - 1}{3f_1} \right) - \exp[2f_1 (\alpha_0 - \alpha)] \sin \left( \alpha_0 + \arctg \frac{2f_1^2 - 1}{3f_1} \right) \right] \right\}^2$$

**Обговорення.** Визначимо умови, коли швидкість руху ґрунту по поверхні глибокорозпушувача на рівні глибини обробітку дорівнює нулю (Golub & Dvornuk,

2020). Ця умова визначає границю між двома режимами роботи глибокорозпушувача (Nazarenko et al., 2020). Якщо швидкість руху ґрунту по поверхні глибокорозпу-

шувача на рівні глибини обробітку менше нуля (Brown & Richards, 2018), то глибокорозпушувач працює в режимі розпушування (Yousif et al., 2013). Кут між дотичною до напрямної у початку координат та горизонталлю – кут підйому  $\alpha_0$  вибирається так, щоб пластичні деформації не потрапляли у дно борозни і не ущільнювали її. Це досягається дотриманням нерівності  $\alpha_0 \leq \frac{45^\circ - \varphi_2}{2}$ .

**Висновки.** Визначено умови руху структурного агрегату ґрунту, що визначає границю між двома режимами роботи глибокорозпушувача. Якщо швидкість руху ґрунту по поверхні глибокорозпушувача на рівні глибини обробітку менше нуля, то глибокорозпушувач працює в режимі розпушування. Кут між дотичною до напрямної у початку координат та горизонталлю – кут підйому  $\alpha_0$  вибирається так, щоб пластичні деформації не потрапляли у дно борозни і не ущільнювали її.

#### **Бібліографічні посилання:**

1. Brown, R. & Richards, A. (2018). Engineering principles of agricultural machinery. ASABE, 84(2): 1120–1132.
2. Celik, A. (2013). Strip tillage width effects on sunflower seed emergence and yield. *Soil and Tillage Research*, 131: 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.03.004>.
3. Charman, W. C., Moxey, A. P. & Towers, W. (2015). Mitigating arable soil compaction: are view and analysis of available cost and benefit data. *Soil and Tillage Research*, 146: 10–25.
4. Foley, K. M., Shock, C. C., Norberg, O. S. & Welch, T. K. (2012). Making strip tillage work for you: a grower's guide, Oregon State University, Department of Crop and Soil Science Ext. CrS: 140.
5. Golub, G. & Dvornyk, A. (2020). Research of indicators strip tillage. *TEKA. Quarterly journal of agri-food industry*, 20(2): 83–90.
6. Hossain, M. S., Gathala, M. K., Tiwari, T. P. & Hossain, M. S. (2014). Strip tillage seeding technique: a better option for utilizing residual soil moisture in rain fed moisture stress environments of North-West Bangladesh. *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology*, 2(4 April): 132–136.
7. Hryniv, A., Rogovskii, I., Aulin, V., Lysenko, S., Titova, L., Zagurskiy, O. & Kolosok, I. (2020). Development of a system for determining the informativeness of the diagnosing parameters of the cylinder-piston group of the diesel engines in operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(105): 19–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206073>.
8. Lekavičienė, K., Šarauska, E., Naujokienė, V., Buragienė, S. & Kriauciūnienė, Z. (2019). The effect of the strip tillage machine parameters on the traction force, diesel consumption and CO<sub>2</sub> emissions. *Soil and Tillage Research*, 192: 95–102.
9. Nazarenko, I., Dedov, O., Beryk, I., Rogovskii, I., Bondarenko, A., Zapryvoda, A. & Titova, L. (2020). Study of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(7–108): 71–79. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217747>.
10. Nazarenko, I., Mishchuk, Y., Mishchuk, D., Ruchynskiy, M., Rogovskii, I., Mikhailova, L., Titova, L., Berezovyi, M. & Shatrov, R. (2021). Determination of energy characteristics of material destruction in the crushing chamber of the vibration crusher. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(7(112)): 41–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239292>.
11. Pöhlitz, J., Rücknagel, J., Koblenz, B., Schlüter, S., Vogel, Hans-Jörg & Olaf, C. (2018). Computed tomography and soil physical measurements of compaction behaviour under strip tillage, mulch tillage and no tillage. *Soil and Tillage Research*, 175: 205–216. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.007>.
12. Rogovskii, I. L. (2019). Systemic approach to justification of standards of restoration of agricultural machinery. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv, Ukraine, 10(3): 181–187. <https://doi.org/10.31548/machenergy2019.03.181>.
13. Rogovskii, I. L., Titova, L. L., Gumenyuk, Yu. O. & Nadochiy, O. V. (2021). Technological effectiveness of formation of planting furrow by working body of passive type of orchard planting machine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 839: 052055. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/5/052055>.
14. Rogovskii, I., Titova, L., Sivak, I., Berezova, L. & Vyhovskiy, A. (2022). Technological effectiveness of tillage unit with working bodies of parquet type in technologies of cultivation of grain crops. *Engineering for Rural Development*, 21: 884–890. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2022.21.TF279>.
15. Rogovskii, I. L., Titova, L. L., Trokhaniak, V. I., Haponenko, O. I., Ohienko, M. M. & Kulik, V. P. (2020). Engineering management of tillage equipment with concave disk spring shanks. *INMATEH. Agricultural Engineering*, 60(1): 45–52. <https://doi.org/10.35633/inmateh-60-05>.
16. Rogovskii, I., Titova, L., Novitskii, A. & Rebenko, V. (2019). Research of vibroacoustic diagnostics of fuel system of engines of combine harvesters. *Engineering for Rural Development*, 18: 291–298. <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N451>.
17. Romaniuk, W., Polishchuk, V., Marczuk, A., Titova, L., Rogovskii, I. & Borek, K. (2018). Impact of sediment formed in biogas production on productivity of crops and ecologic character of production of onion for chives. *Agricultural Engineering*, 22(1): 105–125. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2018-0010>.
18. Vaitauskienė, K., Šarauska, E., Kęstutis, Romanekasb & Jasinskas, A. (2017). Design, development and field evaluation of row-cleaners for strip tillage in conservation farming. *Soil and Tillage Research*, 174: 139–146.
19. Yinyana, S., Sunb, X., Xiaochanc, W., Zhichaoa, H., Newmanb, D. & Weimin, D. (2019). Numerical simulation and field tests of minimum-tillage planter with straw smashing and strip laying based on EDEM software. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166: 105021.
20. Yousif, A. L., Dahab, H. M. & El-Ramlawi, R. H. (2013). Crop-machinery management system for field operations and farm machinery selection. *Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development*, 5: 84–90.

**Dvornyk A. V.**, Candidate of Technical Sciences, (PhD), National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**Analytical modeling of movement of structural aggregate of soil through the working surface of chisel**

The conditions of movement of the structural aggregate of the soil, which determines the boundary between the two modes of operation of the deep loosener, have been determined. If the speed of soil movement on the surface of the deep loosener at the level of the depth of cultivation is less than zero, then the deep loosener works in the loosening mode. The angle between the tangent to the guide at the origin of the coordinates and the horizontal – the elevation angle  $\alpha_0$  is chosen so that plastic deformations do not enter the bottom of the furrow and do not compact it. At the same time, the mathematical model of soil cultivation is made taking into account the following assumptions: the movement of the working body is translational, when all points of the deep loosener have identical speeds and accelerations; the deep loosener moves with some average steady speed, that is, in the first approximation, uniformly; according to experimental studies, the collision of soil masses with the working surface of the deep loosener during processing is inelastic with a negligibly small coefficient of recovery; the left-hand coordinate system associated with the middle of the working blade of the deep loosener, relative to which the movement of the soil is studied and which progressively and uniformly moves together with the machine-tractor unit during the established process of strip cultivation, is considered an inertial reference system with a high degree of accuracy; forces of interaction of a separate structural aggregate of the soil, the movement of which is being studied, with other structural aggregates of the soil of the soil flow are considered balanced in the first approximation, and therefore are not taken into account. The article substantiates that the movement of the structural aggregate of the soil does not depend on the driving forces of the energy means, but turns into independent movement under the action of the force of gravity, the force of the surface reaction, taking into account the friction force of the structural aggregate of the soil on the metal surface, which interfere with free movement. To determine the value of the speed depending on the angle of installation of the blade to the horizon, the well-known equation of equilibrium of the structural aggregate of the soil on the surface of the deep loosener was used. The author compiled a system of nonlinear differential equations of the second order, which reflects the movement of the structural aggregate of the soil along the parabolic cylindrical surface of the deep loosener. Considering that the normal component of the reaction is perpendicular to the Oy axis, it is concluded that all the applied forces are located in the central plane of symmetry of the deep loosener, and therefore the velocity and acceleration vectors of the structural aggregate of the soil are not projected onto the Oy axis.

**Key words:** structural aggregate of soil, chisel, work surface, movement on surface.