

JUSTIFICATION OF GROVE-LIKE ROD SHAPE OF THE SOIL TILLAGE UNIT FOR PRE-SOWING PROCESSING

H. Tesliuk, E. Aliiev, O. Zolotovska*

Dnipro State Agrarian and Economics University, Dnipro, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES



ABSTRACT

To prepare the soil for sowing, tillers with a horizontal or vertical rotation axis of the working body are used. Horizontal rotary working bodies make it possible to form three horizontal layers relative to the arable horizon with different contents of soil aggregates. In order to ensure the simultaneous grinding and separation of the soil, it is necessary to justify the shape and geometric dimensions of the working body of the tillage module for pre-sowing tillage. The method of bionic engineering was used to determine the most rational shape. For this purpose, the locomotion and biomechanics of the soil fauna were considered, namely the process of interaction of animal claws with the soil. To determine the degree of soil grinding, a refined mathematical model of A. M. Panchenko was used, which allows researchers to analyze the work of active bodies that perform both translational and rotational motion. Taking into account the proposed model of soil grinding, a geometric calculation of the shape of the rod of the bionic tillage unit for pre-sowing tillage was carried out based on the morphology of the claws of soil fauna animals, and its three-dimensional model was built. Animal claws were approximated using reverse engineering methods. The equations describing the outer and inner surfaces of the claw-shaped rod of the soil tillage unit for pre-sowing tillage were obtained by solving the condition of ensuring the maximum degree of soil grinding in the Wolfram Cloud software package using the FindMaximum function. The results of the calculation of the shape of the claw-like rod of the bionic tillage unit will be used to make an experimental sample of the equipment and further check the quality of soil grinding.

Key words:

soil,
pre-sowing processing,
claw,
bionic tillage unit,
soil grinding degree

Article history:

Received 16.02.2024

Accepted 15.04.2024

***Corresponding author:**

alonaz197@ukr.net

DOI: 10.36910/acm.vi50.1313

To cite this article:

Tesliuk, H., Aliiev, E., & Zolotovska, O. (2024). Justification of grove-like rod shape of the soil tillage unit for pre-sowing processing. *Agricultural Machines*, 50, 7-17. <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1313>

УДК 631.311

**ОБҐРУНТУВАННЯ ФОРМИ ПАЗУРЕПОДІБНОГО ПРУТКА
ҐРУНТООБРОБНОГО АГРЕГАТУ ДЛЯ ПЕРЕДПОСІВНОГО ОБРОБІТКУ****Г.В. Теслюк, Е.Б. Алієв, О.В. Золотовська****Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна*

AGRICULTURAL MACHINES



СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

АНОТАЦІЯ

Для підготовки ґрунту до посіву використовують ґрунтообробні фрези, що мають горизонтальну або вертикальну вісь обертання робочого органу. Горизонтальні ротаційні робочі органи дозволяють утворити три горизонтальні шари відносно орного горизонту з різним вмістом ґрунтових агрегатів. Для забезпечення одночасного подрібнення і сепарування ґрунту необхідно обґрунтувати форму та геометричні розміри робочого органу ґрунтообробного модуля для передпосівного обробітку ґрунту. Для визначення найбільш раціональної форми використано методіку біонічного інжинірингу. Для цього розглянуто локомоцію та біомеханіку ґрунтової фауни, а саме процес взаємодії пазурів тварин з ґрунтом. Для визначення ступеня подрібнення ґрунту використано доопрацьовану математичну модель А. М. Панченка, що дозволяє провести аналіз роботи активних робочих органів, які одночасно виконують поступальний та обертальний рухи. Ураховуючи запропоновану модель подрібнення ґрунту проведено геометричний розрахунок форми прутка біонічного ґрунтообробного агрегату для передпосівного обробітку ґрунту на основі морфології пазурів тварин ґрунтової фауни та побудовано його тривимірну модель. З використанням методів зворотного інжинірингу (Reverse Engineering) проведено апроксимацію пазурів тварин. Розв'язуючи умову забезпечення найбільшого ступеня подрібнення ґрунту у програмному пакеті Wolfram Cloud з використанням функції FindMaximize, отримано рівняння, які описують зовнішню та внутрішню поверхні пазуреподібного прутка ґрунтообробного агрегату. Результати проведеного розрахунку форми пазуреподібного прутка біонічного ґрунтообробного агрегату будуть використані під час створення експериментального зразка агрегату та перевіряння якості подрібнення ґрунту.

Ключові слова:

ґрунт,
передпосівний обробіток,
пазур,
біонічний ґрунтообробний
агрегат,
ступінь подрібнення ґрунту

Історія публікації:

Отримано 16.02.2024
Затверджено 15.04.2024

***Автор для листування:**

alonaz197@ukr.net

DOI: 10.36910/acm.vi50.1313**Цитувати цю статтю:**

Теслюк, Г. В., Алієв, Е. Б., & Золотовська, О. В. (2024). Обґрунтування форми пазуреподібного прутка ґрунтообробного агрегату для передпосівного обробітку. *Сільськогосподарські машини*, 50, 7-17. <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1313>

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Для підготовки ґрунту до посіву переважно використовують ґрунтообробні фрези з горизонтальним або вертикальним розташуванням осі обертання, що дозволяють одночасно підготувати ґрунт для посіву та виконати кілька технологічних операцій за один прохід (Kalinitchenko et al., 2021; Toscano et al., 2022). Водночас, у дослідженнях вказано на необхідність подрібнення та сепарування ґрунту під час його передпосівного обробітку. Використання горизонтальних ротаційних робочих органів дозволить утворити три горизонтальні шари ґрунту відносно орного горизонту з різним вмістом за розміром ґрунтових агрегатів. Однак для забезпечення одночасного подрібнення й сепарування ґрунту необхідно обґрунтувати форму та геометричні розміри робочого органу ґрунтообробного модуля для передпосівного обробітку ґрунту.

Для визначення найбільш раціональної форми скористаємось методиками біонічного інжинірингу (Yongxiang, 2004; Babitsky et al., 2020; Tu et al., 2021). Для цього розглянемо локомоцію та біомеханіку ґрунтової фауни, а саме процес взаємодії пазурів тварин з ґрунтом. Аналіз літературних джерел показує, що вирішення цієї проблеми не є новим. У науковій праці (Yang et al., 2018) для дизайну ґрунтообробних робочих органів досліджено з використанням методу дискретних елементів процес різання ґрунту робочим органом з п'ятьма пазурами лапи крота. Дослідження (Yang et al., 2021) продемонструвало важливу роль комбінації кількох пазурів крота (*Scaptochirus moschatus*) для забезпечення високої ефективності різання ґрунту. Ці результати можуть бути використанні під час розроблення ґрунтообробних робочих органів.

У науковій праці (Wang et al., 2023) запропоновано біонічний пристрій для формування отворів у ґрунті, подібний до східного кротового цвіркуна. Щоб дослідити взаємодію між отвороутворюючим пристроєм та ґрунтом, була створена типова модель дискретних елементів (частинок) ґрунту. Результати продемонстрували, що біонічний пристрій для формування отворів спричиняє менше порушення ґрунту під час процесу формування отворів та може зменшити опір посіву порівняно з традиційним пристроєм.

У дослідженні (Zhang et al., 2019) використано метод дискретних елементів для моделювання руху частини тіла борсука та її взаємодії з ґрунтом. У випадку додавання до лапи додаткових пальців, енергія, необхідна борсуку для копання, значно збільшується, тоді як маса ґрунту, що викопується, збільшується лише поступово. Відповідно до індексу ефективності копання (відношення кількості викопаного ґрунту до необхідної енергії), кисть з п'ятьма пальцями має біомеханічну перевагу, а кривизна пазурів радіусом 25,3 мм – оптимальна.

У дослідженні (Baeckens et al., 2020) були проаналізовані структурні характеристики, склад матеріалу та механічні властивості пазурів кротового цвіркуна з використанням сканувальної електронної мікроскопії, плазмової атомно-емісійної спектроскопії, наноіндентування і аналізу кінцевих елементів. У дослідженні (Li et al., 2022) поєднані базові морфометричні дані та вдосконалені методи аналізу форми пазурів ящірки (*Lacertidae*), а також знайдені значні міжвидові варіації в морфології кігтів.

У праці (Tsang et al., 2019) сканувальну електронну мікроскопію використовували для спостереження за макро- та мікроскопічними й поперечними структурами пазурів жуків-довгоносиків, а математичну модель кігтя використовували для дослідження структурно-функціональних зв'язків. У науковій праці (Zhang et al., 2020) подано результати аналізу кігтів хижих птахів та зосереджено увагу на кігті великого пальця стопи. Для кількісного оцінювання варіації форми кігтів, а також біомеханічних характеристик у рамках філогенетичної структури використано 3D-геометричну морфометрію кігтів тварин й моделювання методом кінцевих елементів та порівняльні філогенетичні методи.

Проведений аналіз літературних джерел вказує на різноманіття форм пазурів у ґрунтовій фауні, які можна згрупувати та використати в якості характеристичної поверхні робочого органу ґрунтообробного модуля для передпосівного обробітку ґрунту.

Теоретичним дослідженням процесу взаємодії ротаційних робочих органів з ґрунтом присвячено багато наукових праць (Pinyuan et al., 2018; Zhang et al., 2020; Matin et al., 2021; Xu et al., 2022; Zhang et al., 2023a; Zhang et al., 2023b). У більшості наукових праць

проведене моделювання робочих органів у САЕ-системах з використанням методу дискретних елементів. Ці дослідження ураховують режимні параметри робочих органів (швидкість переміщення, частота обертання), але практично не враховується форма фрез та безпосереднє різання ґрунту. Тому виникає необхідність провести такі дослідження та обґрунтувати біонічну форму активних робочих органів з використанням моделювання процесу подрібнення ґрунту.

Мета дослідження – ураховуючи модель подрібнення ґрунту, провести геометричний розрахунок біонічного ґрунтообробного агрегату для передпосівного обробітку ґрунту на основі морфології пазурів тварин ґрунтової фауни та побудувати його тривимірну модель.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Подрібнення ґрунту – це технологічний процес послідовного зменшення розмірів структурних агрегатів ґрунту від попередньої крупності до необхідної внаслідок дії зовнішніх сил. Для оцінювання ступеня подрібнення ґрунту використовують показник I , тобто відношення початкового об'єму структурних агрегатів ґрунту до кінцевого (Панченко, 1999):

$$I = \frac{U_0}{U_1}, \quad (1)$$

де U_0 , U_1 – початковий та кінцевий об'єми структурних агрегатів ґрунту, м³.

Крупність маси структурних агрегатів ґрунту, що надходить на подрібнення, залежить від частки вмісту в ній частинок різного розміру, тобто від його структурного складу. Структурний склад маси ґрунту можна визначати за його поверхнею шляхом використання планограми, за якою визначають сумарну площу, яку займають частинки різного розміру.

У результаті дії ріжучого робочого органу змінюється об'єм структурних агрегатів ґрунту та згідно досліджень (Панченко, 1999):

$$I = \frac{1}{I_0} \left(\frac{2K_C E_S}{G_C^2} + 1 \right), \quad (2)$$

де I_0 – початковий ступінь подрібнення ґрунту;

K_C – питомий коефіцієнт різання ґрунту, кН/м²; E_S – модуль пружності ґрунту, кН/м²; G_C – внутрішня напруга, що виникає за сколювання стружки ґрунту, кН/м².

Питомий коефіцієнт різання ґрунту визначають за виразом:

$$K_C = \frac{P_C}{y_h b}, \quad (3)$$

де P_C – тяговий опір різанню ґрунту, кН; y_h – товщина стружки ґрунту, що знімається, м; b – приведена ширина ріжучого периметра робочого органу, м.

Внутрішню напругу, що виникає за сколювання стружки ґрунту, визначають за виразом:

$$G_C = \frac{1}{2\gamma \cos(\alpha_C + \varphi_S) K_L} + \sqrt{\frac{1}{4\gamma^2 \cos^2(\alpha_C + \varphi_S) K_L^2} + \frac{2K_C E_S}{\cos(\alpha_C + \varphi_S)}}, \quad (4)$$

де K_L – приведений коефіцієнт довжини, $K_L = 1$ м; α_C – кут різання, рад; φ_S – кут внутрішнього тертя ґрунту, рад; γ – змінна, м/кН.

Змінну γ визначають за виразом:

$$\gamma = \frac{6 \sin \alpha_0}{\pi g D_{50c}^3 \rho_S (1 - \cos \alpha_0)} \times \left[K_3 - K_4 \left(A_1 + \frac{C_S T_2}{g D_{50c} \rho_S} \right) \right] \times [D_{50c} (1 + 2 \sin \alpha_0) + b], \quad (5)$$

де g – прискорення вільного падіння, $g = 9,8$ м/с²; D_{50c} – ефективний діаметр структурних агрегатів ґрунту, м; ρ_S – питома маса частинок ґрунту, т/м³; C_S – питоме зчеплення частинок ґрунту, кН/м²; α_0 – кут укладання частинок ґрунту, рад; A_1 , K_3 , K_4 , T_2 – константи інтегрування.

Константи інтегрування:

$$A_1 = \left\{ 2 \sin \varphi_S \cos^2 \alpha_0 \sin(\varphi_S + \alpha_0) + [\cos \varphi_S + \sin(\varphi_S + \alpha_0)] \times (1 + 2 \cos^2 \alpha_0) \sin \varphi_S \sin \alpha_0 \right\} / (\sin(\varphi_S + \alpha_0) [\sin \varphi_S - \cos(\varphi_S + \alpha_0)]), \quad (6)$$

$$K_3 = \sum_{n=0}^{n_{cr}} 2^n (\cos^2 \alpha_0 + 2 \cos^4 \alpha_0)^n, \quad (7)$$

$$K_4 = \sum_{n=0}^{n_{cr}-3} 2^n (\cos^2 \alpha_0 + 2 \cos^4 \alpha_0)^n + 2^{n-2} (\cos^2 \alpha_0 + 2 \cos^4 \alpha_0)^{n-2} \times (1 + 2 \cos^2 \alpha_0 + 4 \cos^4 \alpha_0), \quad (8)$$

$$T_2 = \cos^2 \alpha_0 (1 + \sin \alpha_0) + \sin \alpha_0 + \cos \alpha_0 (2 + 3 \cos^2 \alpha_0), \quad (9)$$

де n_{cr} – критична кількість шарів частинок на глибині y_h .

Критичну кількість шарів частинок на глибині y_h визначають за виразом:

$$n_{cr} = \frac{y_h}{D_{50c}}. \quad (10)$$

Подана математична модель (Панченко, 1999) використана автором для розрахунку впливу пасивних робочих органів на ступінь подрібнення ґрунту. Необхідно розширити цю модель для можливості розрахунку активних робочих органів, що виконують одночасно поступальний та обертаний рух.

Морфологія пазурів тварин дозволяє їх узагальнити у вигляді форми, яка подана на **рис. 1**. Використовуючи методи зворотного інжинірингу (Reverse Engineering), проведено апроксимацію пазурів тварин. У загальному

вигляді зовнішній та внутрішній контури пазурів тварин можна апроксимувати таким чином:

$$\begin{cases} y_{in} = a_1(x-b/2) + a_2(x-b/2)^2; \\ y_{out} = a_1(x+b/2) + a_2(x+b/2)^2; \end{cases} \quad (11)$$

де x, y – декартові координати, мм; $y_{out}(x), y_{in}(x)$ – функції, що описують зовнішній та внутрішній контури, мм; a_1, a_2 – коефіцієнти рівнянь регресії.

Аналіз рівнянь (11) полягає у визначенні коефіцієнтів регресії з умови забезпечення найкращого подрібнення ґрунту.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Зображений на **рис. 1** активний робочий орган виконує одночасно обертальний (з частотою обертання n) та поступальний (з швидкістю V) рухи. Згідно наукової праці (Кочеткова & Сушко, 2013) система рівнянь перетворення системи координат має вигляд:

$$\begin{cases} x' = x \cos\left(\frac{2\pi nt}{60}\right) - y \sin\left(\frac{2\pi nt}{60}\right) + Vt; \\ y' = -x \sin\left(\frac{2\pi nt}{60}\right) + y \cos\left(\frac{2\pi nt}{60}\right); \end{cases} \quad (12)$$

де n – частота обертання робочого органу, об/хв; t – час, с; V – швидкість переміщення робочого органу, м/с.

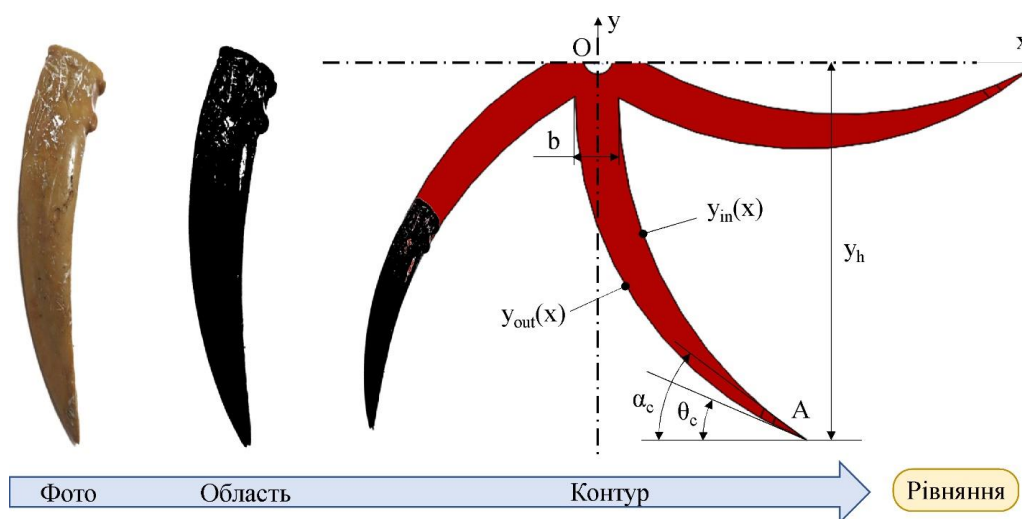


Рис. 1 – Етапи оброблення фотозображення пазурів тварин

Ураховуючи вирази (11) та (12), зовнішній й внутрішній контури описують рівняння:

$$\begin{cases} x'_{in} = (x - b/2) \cos\left(\frac{\pi t}{30}\right) - \\ - \left(a_1(x - b/2) + a_2(x - b/2)^2\right) \sin\left(\frac{\pi t}{30}\right) + Vt; \\ y'_{in} = -(x - b/2) \sin\left(\frac{\pi t}{30}\right) + \\ + \left(a_1(x - b/2) + a_2(x - b/2)^2\right) \cos\left(\frac{\pi t}{30}\right); \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} x'_{out} = (x + b/2) \cos\left(\frac{\pi t}{30}\right) - \\ - \left(a_1(x + b/2) + a_2(x + b/2)^2\right) \sin\left(\frac{\pi t}{30}\right) + Vt; \\ y'_{out} = -(x + b/2) \sin\left(\frac{\pi t}{30}\right) + \\ + \left(a_1(x + b/2) + a_2(x + b/2)^2\right) \cos\left(\frac{\pi t}{30}\right). \end{cases} \quad (14)$$

Координати точки A (x_A , x_B) (рис. 1) визначають з систем рівнянь (13) та (14) шляхом прирівнювання $x'_{in} = x'_{out}$ та $y'_{in} = y'_{out}$:

$$x_A = -\frac{a_1}{2a_2}. \quad (15)$$

Для визначення ступеня подрібнення ґрунту упродовж передпосівного обробітку внаслідок дії пазуреподібного прутка ґрунтообробного агрегату на першому етапі обчислимо тяговий опір різанню ґрунту P_C (Панченко, 1999):

$$P_C = (P_\tau + P_N + 2P_f + P_v) \times \cos\left[\arctg\left(\frac{i + \sin\varphi_0}{\cos\varphi_0} - \varphi_0\right)\right], \quad (16)$$

де P_τ – тяговий опір від сколу ґрунту у повздовжньому напрямку, кН; P_N – тяговий опір від сил тертя та тиску ґрунту по поверхні робочого органу, кН; P_f – тяговий бічний опір від сколу ґрунту в поперечно-вертикальному

напрямку, кН; P_v – опір, що ураховує вплив швидкості різання, кН; i – коефіцієнт ковзання.

Коефіцієнт ковзання визначають за виразом:

$$i = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_0 - \varphi_0\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_0\right)}, \quad (17)$$

де φ_0 – кут зовнішнього тертя, рад; γ_0 – кут зсуву, рад.

Ураховуючи теоретичні дослідження (Панченко, 1999), перетворимо отримані автором закономірності з урахуванням кінематики переміщення пазуреподібного прутка. Тяговий опір від сколу ґрунту у повздовжньому напрямку можна обчислити за виразом:

$$P_\tau = C_s \left[\frac{0,66y_h^2 \text{ctg}\varphi_s}{\cos(\alpha_C + \varphi_s)} + by_h \right] \text{tg}(\alpha_C + \varphi_s), \quad (18)$$

де b – ширина пазуреподібного прутка, м.

Товщина стружки ґрунту y_h , що знімає робочий орган, та кут різання α_C під час руху пазуреподібного прутка змінюються за цими законами:

$$y_h = -(x_A - b/2) \sin\left(\frac{\pi t}{30}\right) + \left(a_1(x_A - b/2) + a_2(x_A - b/2)^2\right) \cos\left(\frac{\pi t}{30}\right), \quad (19)$$

$$\alpha_C = \arctg\left\{ \left[-(x_A - b/2) \sin\left(\frac{\pi t}{30}\right) + \left(a_1(x_A - b/2) + a_2(x_A - b/2)^2\right) \cos\left(\frac{\pi t}{30}\right) \right] / \left[(x_A - b/2) \cos\left(\frac{\pi t}{30}\right) + Vt - \left(a_1(x_A - b/2) + a_2(x_A - b/2)^2\right) \sin\left(\frac{\pi t}{30}\right) \right] \right\}. \quad (20)$$

Тяговий опір від тиску ґрунту та сили тертя ґрунту по поверхні робочого органу можна подати у вигляді двох складових:

$$P_N = P_E + P_\mu, \quad (21)$$

де P_E – горизонтальна складова сили тиску ґрунту на поверхню робочого органу, кН; P_μ – тяговий опір від тертя ґрунту поверхню робочого органу, кН.

Горизонтальну складову сили тиску ґрунту на поверхню робочого органу визначають за виразом:

$$P_E = \frac{1}{2} g b y_h^2 t g^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_s}{2} \right) \rho_s \sin \varphi_s. \quad (22)$$

Тяговий опір від тертя ґрунту поверхню робочого органу визначають за виразом:

$$P_\mu = \frac{1}{2} g b y_h^2 t g^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_s}{2} \right) \times \rho_s \cos(\alpha_c - \varphi_s) \cos \alpha_c t g \varphi_0. \quad (23)$$

Тяговий бічний опір від сколу ґрунту в поперечно-вертикальному напрямку:

$$P_f = y_h^2 \left\{ \frac{C_s}{2} [t g(\alpha_c + \varphi_s) + c t g \alpha_c] \times \frac{0,66 c t g \varphi_s}{\cos(\alpha_c + \varphi_s)} + \frac{g \delta_p}{2} t g^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_s}{2} \right) \rho_s \sin \varphi_s \right\} t g \varphi_0. \quad (24)$$

Опір, який ураховує вплив швидкості різання:

$$P_v = b y_h \rho_s \frac{\sin \alpha_c \cos \theta_c}{\sin(\alpha_c + \theta_c)} V^2, \quad (25)$$

де θ_c – задній кут різання пазуреподібного прутка, рад.

Задній кут різання пазуреподібного прутка обчислюють за виразом:

$$\theta_c = \arctg \left[\left\{ - (x_A + b/2) \sin \left(\frac{\pi t}{30} \right) + (a_1 (x_A + b/2) + a_2 (x_A + b/2)^2) \cos \left(\frac{\pi t}{30} \right) \right\} / \left\{ (x_A + b/2) \cos \left(\frac{\pi t}{30} \right) + V t - (a_1 (x_A + b/2) + a_2 (x_A + b/2)^2) \sin \left(\frac{\pi t}{30} \right) \right\} \right]. \quad (26)$$

Підставляючи у вираз (2) рівняння (16) та (13), отримуємо:

$$I = \frac{1}{I_0} \left\{ 1 + \frac{2 E_s}{G_C^2 y_h b} (P_\tau + P_N + 2 P_f + P_v) \times \left[\arctg \left(\frac{\sin \left(\frac{\pi}{2} - \gamma_0 - \varphi_0 \right)}{\cos \varphi_0 \cos \left(\frac{\pi}{2} - \gamma_0 \right)} + \frac{\sin \varphi_0 \cos \left(\frac{\pi}{2} - \gamma_0 \right)}{\cos \varphi_0 \cos \left(\frac{\pi}{2} - \gamma_0 \right)} - \varphi_0 \right) \right] \right\}. \quad (27)$$

З урахуванням умови підвищення ступеня подрібнення ґрунту, показник I має бути максимальним:

$$I(t, V, n, a_1, a_2) \rightarrow \max. \quad (28)$$

Приймаємо фізико-механічні властивості ґрунту за сталі величини: $\alpha_0 = 0,872$ рад (50°), $D_{50c} = 0,001$ м, $\rho_s = 1,6$ т/м³, $\varphi_s = 0,524$ рад (30°), $C_s = 1,2$ кН/м², $\gamma_0 = 0,698$ рад (40°), $\varphi_0 = 0,384$ рад (22°), $E_s = 32000$ кН/м². Ширину пазуреподібного прутка приймаємо $b = 0,01$ м. Початкову ступінь подрібнення приймаємо рівною $I_0 = 1$.

Аналізуючи джерела (Zhang et al., 2019; Baeckens et al., 2020; Yang et al., 2021; Wang et al., 2023), коефіцієнти рівнянь регресії (11) можуть бути у межах: $a_1 \in [-5; -1]$ і $a_2 \in [-15; -35]$. Розв'язуючи умову (28) разом з виразами (4)–(10), (16)–(26) та (27) у програмному пакеті Wolfram Cloud з використанням функції FindMaximum, отримали значення коефіцієнтів рівнянь (11): $a_1 = -3,20107$; $a_2 = 26,3033$.

Оптимальні значення підтверджуються графічними залежностями, які подані на рис. 2–4. З рис. 2–4 очевидно, що за різних значень частоти обертання n , швидкості руху V та у різні моменти часу t оптимальні значення коефіцієнтів рівняння (11) зберігаються. За рівняннями будуюмо графічну залежність та 3D-модель пазуреподібного прутка ґрунто-обробного агрегату (рис. 5).

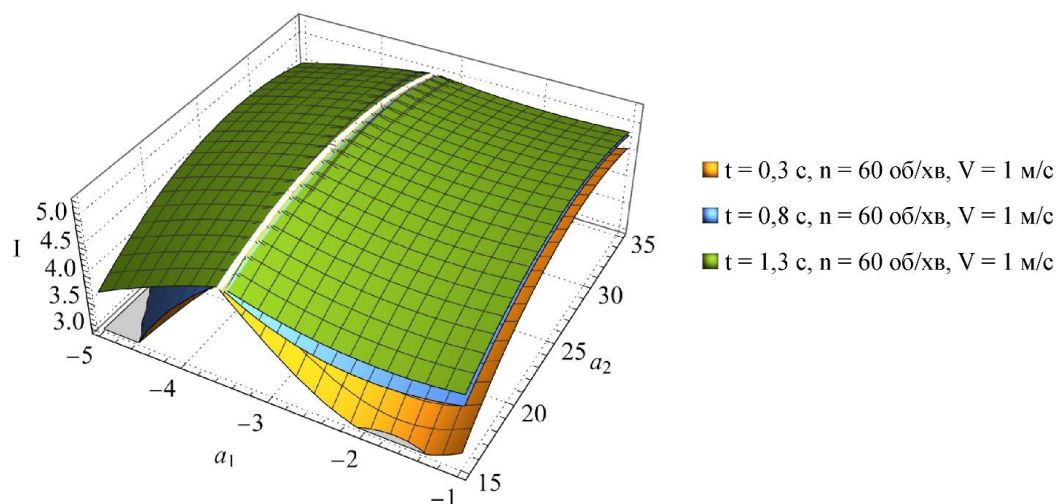


Рис. 2 – Залежність ступеня подрібнення ґрунту I від коефіцієнтів рівняння регресії (11) у різні моменти часу t

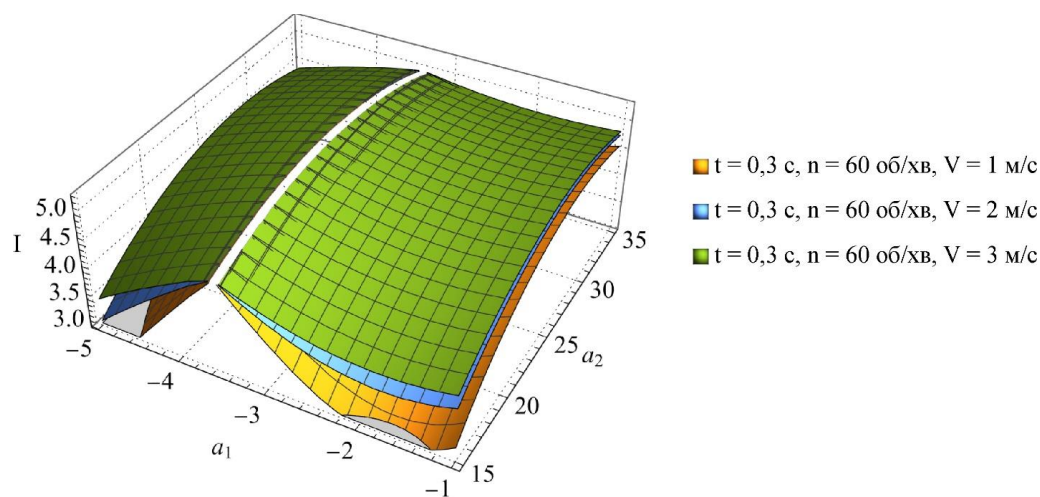


Рис. 3 – Залежність ступеня подрібнення ґрунту I від коефіцієнтів рівняння регресії (11) за різних значень швидкості руху V

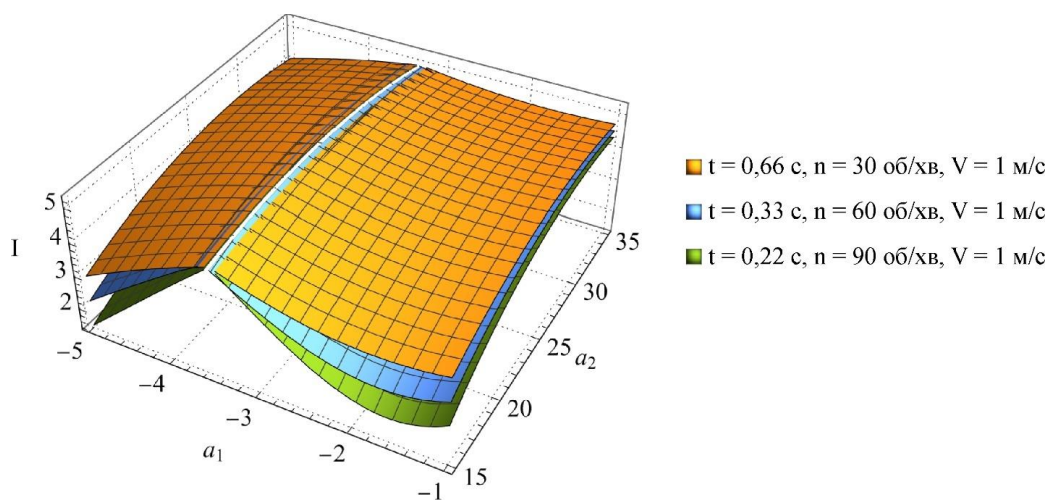


Рис. 4 – Залежність ступеня подрібнення ґрунту I від коефіцієнтів рівняння регресії (11) за різних значень частоти обертання n та у певні моменти часу t

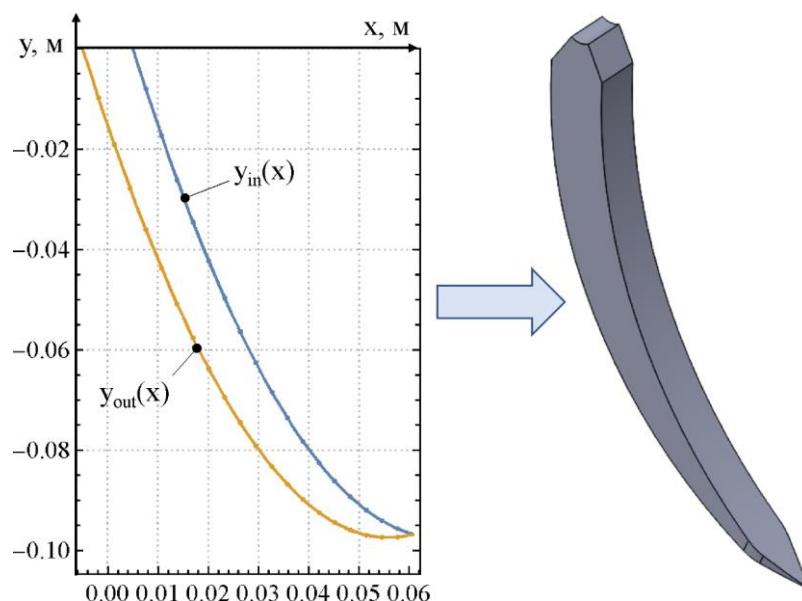


Рис. 5 – Графічні залежності та 3D-модель форми пазуреподібного прутка ґрунтообробного агрегату для передпосівного обробітку ґрунту ($y_{out}(x)$, $y_{in}(x)$ – рівняння зовнішнього та внутрішнього контурів пазуреподібного прутка)

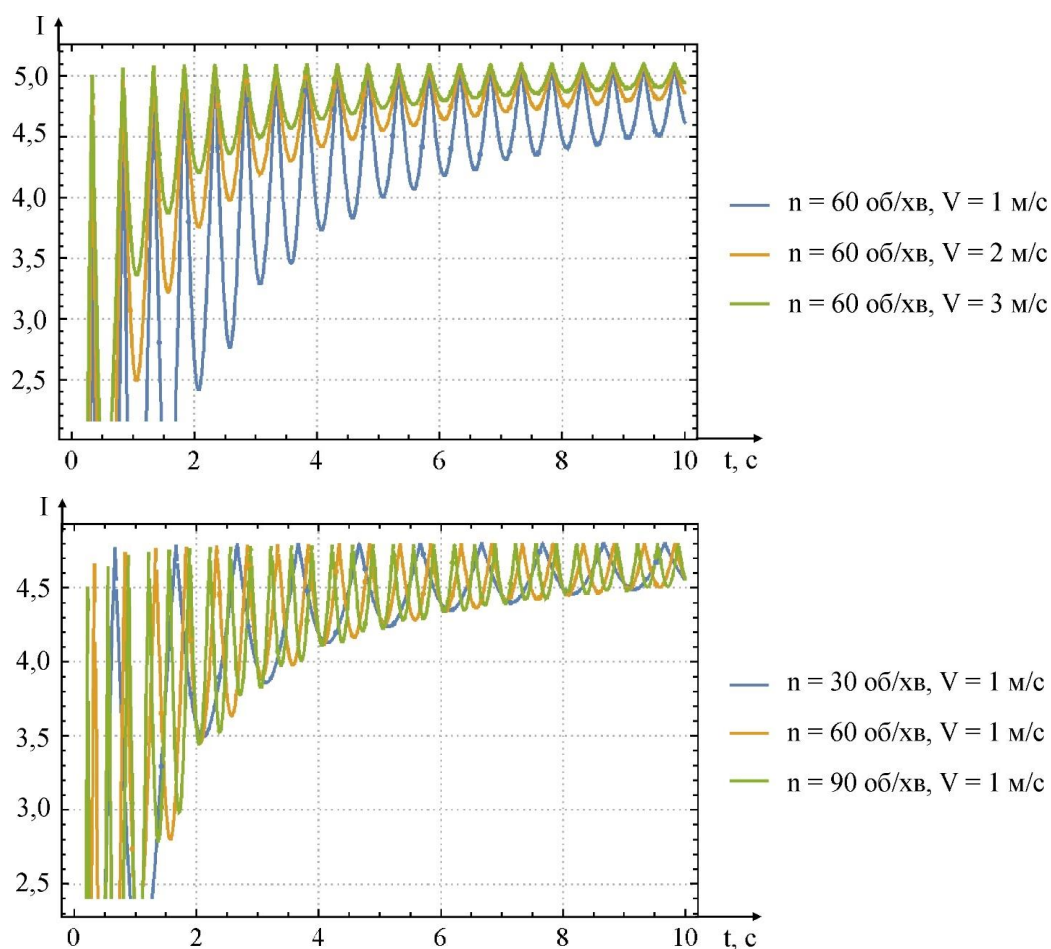


Рис. 6 – Динаміка зміни ступеня подрібнення ґрунту I за різних значень частоти обертання n та швидкості руху V

З використанням програмного пакету Wolfram Cloud, а також урахуваючи прийняті значення, отримані рівняння (4)–(10), (16)–(27) та форму пазуреподібного прутка одержано динаміку зміни ступеня подрібнення ґрунту I за різних значень частоти обертання n та швидкості руху V (рис. 6).

ВИСНОВКИ

Урахуваючи модель подрібнення ґрунту, проведено геометричний розрахунок та обґрунтовано форму прутка біонічного ґрунтообробного агрегату для передпосівного обробітку ґрунту на основі морфології пазурів тварин ґрунтової фауни та побудовано його тривимірну модель. Використовуючи методи зворотного інжинірингу (Reverse Engineering) проведено апроксимацію пазурів тварин. Розв'язуючи умову забезпечення найбільшого ступеня подрібнення ґрунту I у програмному пакеті Wolfram Cloud з використанням функції FindMaximum, отримані рівняння зовнішньої та внутрішньої поверхонь пазуреподібного прутка ґрунтообробного агрегату для передпосівного обробітку ґрунту:

$$y_{in}(x) = 0,0166629 - 3,4641x + 26,3033x^2; \quad (29)$$

$$y_{out}(x) = -0,0153478 - 2,93804x + 26,3033x^2. \quad (30)$$

Викладені у статті результати розрахунку форми пазуреподібного прутка біонічного ґрунтообробного агрегату для передпосівного обробітку ґрунту будуть використані для створення експериментального зразка робочого органу та подальшого перевіряння якості подрібнення ґрунту.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Babitsky, L. F., Sobolevsky, I. V., & Kuklin, V. A. (2020). Bionic modelling of the working bodies of machines for surface tillage. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 488, 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/488/1/012041>
- Baeckens, S., Goeyers, C., & Van Damm, R. (2020). Convergent evolution of claw shape in a transcontinental lizard radiation. *Integrative and Comparative Biology*, 60(1), 10-23. <https://doi.org/10.1093/icb/icz151>
- Kalinitchenko, V. P., Glinushkin, A. P., Sharshak, V. K., Ladan, E. P., Minkina, T. M., Sushkova, S. N., Mandzhieva, S. S., Batukaev, A. A., Chernenko, V. V., & Ilyina, L. P. (2021). Intra-soil milling for stable evolution and high productivity of kastanozem soil. *Processes*, 9, 1302. <https://doi.org/10.3390/pr9081302>
- Li, L., Sun, W., Guo, C., Guo, H., Lili, L., & Yu, P. (2022). Mathematical model and nanoindentation properties of the claws of *Cyrtotrachelus buqueti* Guer (Coleoptera: Curculionidae). *IET Nanobiotechnol*, 16, 211-224. <https://doi.org/10.1049/nbt2.12089>
- Matin, Md. A., Hossain, Md. I., Gathala, M. K., Timsina, J., & Krupnik, T. J. (2021). Optimal design and setting of rotary strip-tiller blades to intensify dry season cropping in Asian wet clay soil conditions. *Soil and Tillage Research*, 207, 104854. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104854>
- Pingyuan, X., Zhou, Y., Zhiquan, S., Qianqian, Z., Yangqing, H., & Zhuowei, Z. (2018). Simulation analysis and experiment for three-axis working resistances of rotary blade based on discrete element method. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 34(18), 113-121. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2018.18.014>
- Toscano, P., Brambilla, M., Cutini, M., & Bisaglia, C. (2022). The stony soils reclamation systems in agricultural lands: A review. *Agricultural Sciences*, 13, 500-519. <https://doi.org/10.4236/as.2022.134034>
- Tsang, L. R., Wilson, L. A. B., Ledogar, J., Wroe, S., Attard, M., & Sansalone, G. (2019). Raptor talon shape and biomechanical performance are controlled by relative prey size but not by allometry. *Scientific Reports*, 9, 7076. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43654-0>
- Tu, C., Li, J., Wang, X., Shen, C., & Li, J. (2021). Bionic technology and deep learning in agricultural engineering: current status and future prospects. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 17(2), 217-231. <https://doi.org/10.3844/ajbbsp.2021.217.231>
- Wang, L., Xing, J., He, X., Li, X., Guo, W., Wang, X., & Hou, S. (2023). Study on the mechanism of motion interaction between soil and a bionic hole-forming device. *Agriculture*, 13, 1421. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071421>
- Xu, G., Xie, Y., Liang, L., Ding, Q., Xie, H., & Wang, J. (2022). Straw-soil-rotary blade interaction: interactive effects of multiple operation parameters on the straw movement. *Agronomy*, 12, 847. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040847>
- Yang, Y., Li, M., Tong, J., & Ma, Y. (2018). Study on the Interaction between soil and the five-claw combination of a mole using the discrete element method. *Applied Bionics and Biomechanics*, 7854052. <https://doi.org/10.1155/2018/7854052>
- Yang, Y., Tong, J., Huang, Y., Li, J. & Jiang, X. (2021). Impact of the multi-claw combination on the soil-cutting performance of *Scaptochirus moschatus* (Mammalia, Soricomorpha, Talpidae).

- Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 32, 869-879. <https://doi.org/10.1007/s12210-021-01032-x>
- Yongxiang, L. (2004). Significance and progress of bionics. *Journal of Bionic Engineering*, 1(1), 1-3. <https://doi.org/10.1007/BF03399448>
- Zhang, Z., Song, Y., Ren, L., & Zhang, H. (2020). Research on simulation analysis of soil cutting process by ditcher. *Journal of Physics: Conference Series*, 1550, 042003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1550/4/042003>
- Zhang, J., Xia, M., Chen, W., Yuan, D., Wu, C., & Zhu, J. (2023a). Simulation analysis and experiments for blade-soil-straw interaction under deep ploughing based on the discrete element method. *Agriculture*, 13, 136. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010136>
- Zhang, X., Zhang, L., Hu, X., Wang, H., & Shi, X. (2023b). Calibrating contact parameters of typical rotary tillage components cutting soil based on different simulation methods. *Scientific Reports*, 13, 5757. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32881-1>
- Zhang, Z., Zhang, Y., Zhang, J., & Zhu, Y. (2019). Structure, mechanics and material properties of claw cuticle from mole cricket *Gryllotalpaorientalis*. *PLOS ONE*, 14(9), e0222116. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222116>
- Кочеткова, І. Б., & Сушко, Л. Ф. (2013). *Вища математика в формулах та таблицях (Higher Mathematics in Formulas and Tables)*. Дніпропетровськ: НМетАУ.
- Панченко, А. Н. (1999). *Теорія измельчення ґрунту ґрунтообробувальними оруддями (Theory of Soil Grinding With Tillage Tools)*. Дніпропетровськ: ДГАУ.