

УДК[631.312.021:634]

## ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРЯМНОЇ ПОВЕРХНІ ДОЛОТА РОБОЧОГО ОРГАНУ ЧИЗЕЛЬНОГО ЗНАРЯДДЯ

Караєв О.Г., д.т.н.,

[oleksandr.karaiev@tsatu.edu.ua](mailto:oleksandr.karaiev@tsatu.edu.ua), ORCID:0000-0001-5134-1727

Матковський О.І., к.т.н.,

[oleksandr.matkovskiy@tsatu.edu.ua](mailto:oleksandr.matkovskiy@tsatu.edu.ua), ORCID: 0000-0003-4188-6277

Чижиков І.О., к.т.н.,

[ivan.chyzhykov@tsatu.edu.ua](mailto:ivan.chyzhykov@tsatu.edu.ua), ORCID 0000-0002-3022-4828

Сушко С.Л., к.т.н.,

[serhii.sushko@tsatu.edu.ua](mailto:serhii.sushko@tsatu.edu.ua), ORCID 0000-0002-2933-2573

*Таврійський державний агротехнологічний університет  
імені Дмитра Моторного (м. Мелітополь, Україна)*

*Запропоновано математичну модель формування напрямної поверхні долота робочого органу чизельного знаряддя для обробітку ґрунту. Зазначено, що застосування чизельних знарядь при вирощуванні сільськогосподарських культур сприяють формуванню відповідних умов для росту і розвитку рослин. Значний ефект від застосування чизельних знарядь досягається на ґрунтах з ознаками прояву водних або повітряних ерозійних процесів за рахунок створення оптимального водно-повітряного режиму ґрунтів із збереженням стерні на поверхні поля. Звернуто увагу на те, що з метою зниження тягового опору чизельних знарядь значну увагу приділяють проведенню досліджень з визначення оптимальних геометричних параметрів форми і положення їх робочих органів.*

*Робочі органи чизельного знаряддя оснащені долотами, які можуть мати різні конструктивні рішення з відповідними геометричними параметрами їх форм і положень. Доведено, що тяговий опір чизельного знаряддя в значній мірі залежить від геометричних параметрів форми криволінійної напрямної поверхні долота. Використання доліт з поверхнею у вигляді площини, як показали попередні дослідження, сприяє збільшенню зусилля на переміщення відділеної скиби ґрунту від масиву.*

*Визначено, що задача оптимізації параметрів форми долота полягає у визначенні такої форми напрямної його поверхні, яка забезпечувала б зменшення початкового значення відносної швидкості частки ґрунту до мінімального, наприкінці її переміщення по поверхні. Математичним моделюванням руху частки ґрунту по напрямній поверхні долота отримано нелінійний функціонал, який відображає упорядкований векторний простір множини фізичних сил взаємодії частки ґрунту з поверхнею в множену дійсних чисел. Мінімальне значення визначеного функціоналу забезпечує виникнення неперервної функції напрямної поверхні долота, на якій швидкість частки ґрунту наприкінці її переміщення по поверхні буде дорівню-*

вати нулю. Зазначено, що методи варіаційного числення пошуку оптимального розв'язку отриманого нелінійного функціоналу є дуже складним, а пошук оптимальної функції має бути здійснено серед поліномів.

*Ключові слова:* чизельне знаряддя, робочий орган, долото, напрямна, поверхня, параметри форми, відносна швидкість, функціонал, ґрунт.

**Постановка проблеми.** Застосування чизельних знарядь для обробітку ґрунту отримує все більш широке поширення. При цьому, з метою зниження тягового опору знарядь значну увагу приділяють проведенню досліджень з визначення оптимальних геометричних параметрів форми долота [1]. Однак, досліджень взаємодії долота з ґрунтом із застосуванням геометричного моделювання проведено недостатньо, що, на нашу думку, стримує розвиток конструкцій знарядь даного типу і, як наслідок, ефективність їх застосування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Оранка відвальними плугами для основного обробітку ґрунту займає значне місце. Але існують регіони з ґрунтово-кліматичними умовами вирощування сільськогосподарських культур, де застосування глибокого рихлення має переваги перед оранкою. Дослідженнями [2] встановлено, що на глинисто-суглинистих ґрунтах Нігерії відвальний плуг має найбільший тяговий опір в порівнянні з дисковим і чизельним, а найменше значення тягового опору спостерігалось у дискових плугів. Також знаряддя з чизельними робочими органами застосовують при основному обробітку ґрунтів, на яких відбуваються прояви водних або повітряних ерозійних процесів. Такі знаряддя сприяють створенню оптимального водно-повітряного режиму ґрунтів із збереженням стерні на поверхні поля [3].

Значну увагу в світі дослідники приділяють вивченню впливу різних форм доліт на зниження тягового опору чизельних знарядь. Дослідження щодо визначення раціональних форм доліт, а також робочих органів, у яких відбувається рух ґрунту по поверхням з криволінійними напрямними наведені в роботах [4, 5, 6].

**Формулювання цілей статті.** Визначити функціонал форми напрямної поверхні долота робочого органу чизельного знаряддя за критерієм мінімізації відносної швидкості частки ґрунту наприкінці його переміщення по поверхні долота.

**Основна частина.** Серед геометричних параметрів долота робочого органу чизельного знаряддя, які впливають на його тяговий опір, вагоме значення припадає на напрямну поверхню долота. Чизельні знаряддя призначені для обробітку ґрунту з метою зменшення його щільності ґрунту без забезпечення відповідної структури. Тобто, основну деформацію пласта ґрунту здійснює носок долота, а для зниження тягового опору знаряддя бажано щоб деформація пласта знижувалась до мінімуму на рівні «денної» поверхні поля (рис. 1).

Взаємодія долота з ґрунтом має такі фази: I – різання ґрунту,

II – рух ґрунту по поверхні долота.

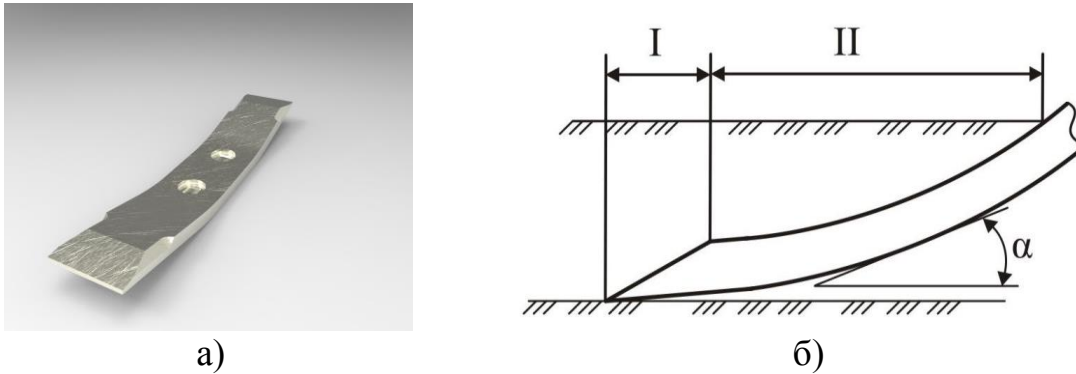


Рис. 1. Долото робочого органу чизельного знаряддя:  
а) загальний вигляд долота; б) схема фаз руху ґрунту по поверхні долота: I – різання ґрунту, II – рух ґрунту по поверхні долота,  $\alpha$  – кут встановлення долота

З наведеного виходить, що задача оптимізації параметрів форми долота полягає у визначенні такої форми напрямної його поверхні, яка забезпечувала б зменшення початкового значення відносної швидкості частки ґрунту до мінімального, наприкінці її переміщення по поверхні. Тому за критерій оптимізації напрямної поверхні прийнято кінцеву швидкість руху частки ґрунту по долоту.

Припущення: знехтуємо силами внутрішньої взаємодії ґрунтових агрегатів та будемо вважати, що рух ґрунту гальмується внаслідок сил тертя тільки по поверхні долота, а сила тертя прямо пропорційна силі її реакції. Нехай параметри напрямної  $L$  поверхні долота, коефіцієнт тертя частки ґрунту по поверхні  $\mu$  і початкова швидкість її руху  $v_0$ , описується у декартових координатах рівнянням  $y=y(x)$  при  $0 \leq x \leq h_x$  (рис. 2). Швидкість частки ґрунту у кінцевій точці  $(h_x, y(h_x))$  фактично є функціоналом від аргументу  $y(x)$ . Знайдемо аналітичний вираз цього функціоналу.

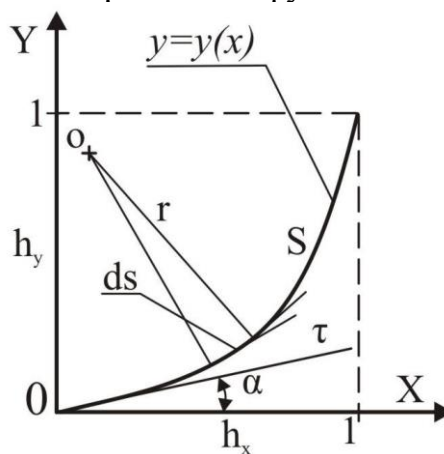


Рис. 2. Схема параметрів положення напрямної  $S$  в системі декартових координат  $YOX$ :  $r$  – миттєвий радіус кривизни;  $ds$  – елементарна довжина дуги;  $\tau$  – дотична;  $\alpha$  – кут нахилу дотичної

При відомій функції  $y(x)$  кінцева швидкість частки ґрунту є функцією довжини дуги  $s$ , пройденої вздовж напрямної  $S$  поверхні долота. Введемо рухому систему координат, направивши вісь  $Ox'$  вздовж миттєвого напрямку швидкості руху  $\bar{v}$  частки ґрунту, а вісь  $Oy'$  – вздовж напрямку сили нормальної реакції поверхні  $N$  (рис. 3).

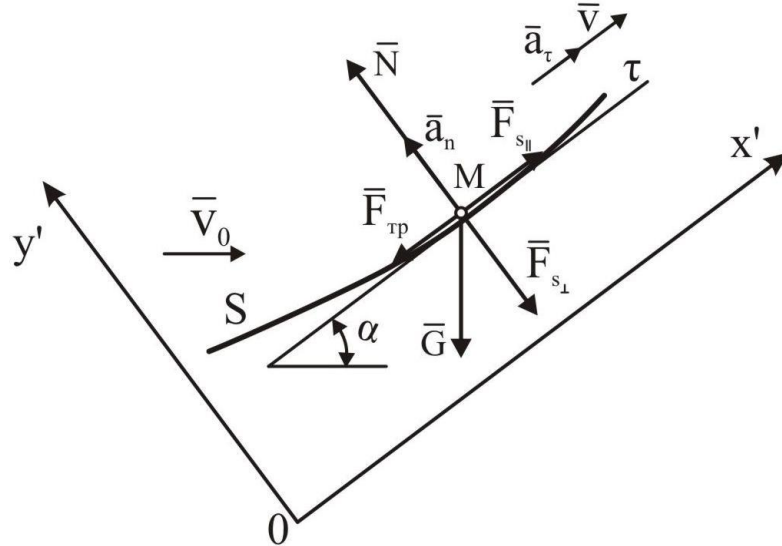


Рис. 3. Схема сил діючих на частку ґрунту в рухомій системі координат  $y'Ox'$ .

Прискорення  $a$  частки ґрунту  $M$  викликане дією сили  $F$  (в подальшому сила опору  $F_s$ ), яка прямо пропорційна силі тертя  $F_{mp}$  і силі нормальної реакції поверхні  $N$ , сприяє виникненню відцентрового прискорення частки ґрунту  $a_n$  (рис. 3). Тоді маємо рівняння:

$$\frac{dv}{ds} = \frac{dv}{dt} \left[ \frac{ds}{dt} \right]^{-1} = \frac{a}{v} = \frac{1}{v} \frac{F}{m} = \frac{1}{v} \left( -\mu \frac{mv^2}{r} \right) = -\mu \frac{v}{r}. \quad (1)$$

де  $v$  – миттєва швидкість руху частки ґрунту;  $F_{mp}$  – сила тертя, яка дорівнює  $F_{mp} = N \cdot \mu$  (де  $N$  – нормальна реакція поверхні,  $\mu$  – коефіцієнт зовнішнього тертя ґрунту);  $m$  – маса частки ґрунту, яку будемо вважати еквівалентною сили тяжіння  $G = m \cdot g$ ;  $r$  – миттєвий радіус кривини.

Розділивши у рівнянні (1) змінні та врахувавши початкові умови, матимемо задачу Коші:

$$\frac{dv}{v} = -\mu \frac{ds}{r} \quad v(0)=v. \quad (2)$$

Після інтегрування рівняння (2) маємо

$$\ln|v| = -\mu \int_0^x \frac{ds}{r} + C, \quad (3)$$

тобто, загальний розв'язок можна записати у вигляді:

$$v = C_1 e^{-\mu \int_0^x \frac{ds}{r}}. \quad (4)$$

Після накладення на розв'язок умови Коші отримаємо наступний частинний розв'язок:

$$v = v_0 e^{-\mu \int_0^x \frac{ds}{r}}. \quad (5)$$

Значення миттєвої швидкості наприкінці переміщення частки ґрунту по поверхні напрямній:

$$v_k = v_0 e^{-\mu \int_0^{h_x} \frac{ds}{r}}, \quad (6)$$

тобто, задача мінімізації кінцевої миттєвої швидкості  $v_k$  еквівалента задачі максимізації інтегралу  $\int_0^{h_x} \frac{ds}{r}$ .

Розглянемо геометричний зміст цього інтегралу (рис. 2).

Підінтегральний вираз являє собою кут, який з центру кривизни визначає елементарну дугу  $ds$  на напрямній  $S$ . Так як цей кут дорівнює куту, на який повернулася дотична, то інтеграл взагалі дорівнює різниці кутів нахилу дотичної до осі  $Ox$  на початку та наприкінці переміщення частки ґрунту. Тому кінцева швидкість буде дорівнювати:

$$v_k = v_0 e^{-\mu \int_0^{h_x} \frac{ds}{r}} = v_0 e^{\text{arctg} \gamma'(0) - \text{arctg} \gamma'(h_x)}. \quad (7)$$

Чим більша ця різниця, тим більше інтеграл. Найбільша різниця серед кривих, що задовольняють умовам (2), виконується для тих кривих, у яких початкове положення дотичної горизонтальне, а кінцеве – вертикальне (чверть кола або еліпсу).

Будемо вважати, що окрім сили тертя об поверхню долота, незалежної від швидкості руху, на частку ґрунту діє сила опору, яка пропорційна швидкості руху частки ґрунту відносно шару ґрунту:

$$F_s = kv, \quad (8)$$

де  $v$  – відносна швидкість;  $k$  – коефіцієнт пропорційності.

Виведемо рівняння руху частки ґрунту, розклавши силу опору  $F_s$  на дві складові:  $F_{s\parallel}$  та  $F_{s\perp}$  (рис. 3).

Запишемо рівняння другого закону Ньютона в проекції на обидві вісі:

$$\begin{aligned} O x': -F_{mp} + F_{s\parallel} &= m a_\tau; \\ O y': N - F_{s\perp} &= m a_n. \end{aligned} \quad (9)$$

Складові  $F_{s\parallel}$  та  $F_{s\perp}$  можна визначити, якщо розкласти відносну швидкість на два відповідні складові вздовж вісі  $Ox'$  та  $Oy'$  –  $v_{\parallel}$  та  $v_{\perp}$ . Це можна зробити, так як сила опору колінеарна вектору швидкості та модуль цієї сили пропорційний модулю швидкості.

Врахуємо, що відносні швидкості  $v_{\parallel}$  та  $v_{\perp}$  (рис. 3) дорівнюють:

$$v_{\parallel} = v_0 \cos \alpha - v, \quad v_{\perp} = v_0 \sin \alpha.$$

Тоді маємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} -F_{mp} + F_{s\parallel} = ma_{\tau} \\ N - F_{s\perp} = ma_n \\ F_{mp} = \mu N \\ F_{s\perp} = kv_0 \sin \alpha \\ F_{s\parallel} = k(v_0 \cos \alpha - v) \end{cases}. \quad (10)$$

Сили, що входять до цієї системи, є залежними від миттєвої швидкості руху  $v$ . Виразимо цю систему рівнянь через  $v$ . Як відомо,  $a_n = \frac{v^2}{r}$ , де  $r$  – радіус кривизни напрямної у даній точці,  $v$  – модуль вектора швидкості. Перетворимо систему (10).

Друге рівняння:  $N = F_{s\perp} + ma_n$ , а третє та четверте рівнянь

$$F_{mp} = \mu(F_{s\perp} + ma_n) = \mu \left( kv_0 \sin \alpha + \frac{mv^2}{r} \right).$$

Взявши до уваги, що  $a_{\tau} = \frac{dv}{dt}$  з першого та п'ятого рівнянь маємо:

$$mv' = kv_0 \cos \alpha - kv - \mu \left( kv_0 \sin \alpha + \frac{mv^2}{r} \right), \quad (11)$$

приймавши  $k\tilde{=} = \frac{k}{m}$  маємо:

$$v' = k\tilde{=} v_0 (\cos \alpha - \mu \sin \alpha) - k\tilde{=} v - \frac{\mu}{r} v^2. \quad (12)$$

Від змінної  $t$  (час) перейдемо до змінної  $s$ :

$$\frac{dv}{ds} = \frac{dv}{dt} \cdot \left[ \frac{ds}{dt} \right]^{-1} = \frac{k\tilde{=} v_0 (\cos \alpha - \mu \sin \alpha)}{v} - k\tilde{=} - \frac{\mu}{r} v. \quad (13)$$

Це рівняння перетворимо вважаючи, що рівняння кривої, яка визначає форму напрямної  $S$ , можна подати у явному вигляді  $y=y(x)$ , приймавши у якості незалежної змінної  $x$ .

Тоді з рівності  $y' = tg \alpha$  маємо:

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \frac{1}{\sqrt{1 + tg^2 \alpha}} = \frac{1}{\sqrt{1 + y'^2}}; \\ \sin \alpha &= tg \alpha \cdot \cos \alpha = \frac{y'}{\sqrt{1 + y'^2}}. \end{aligned} \quad (14)$$

Перетворимо похідну:

$$\frac{dv}{dx} = \frac{dv}{ds} \cdot \frac{ds}{dx} = \frac{dv}{ds} \sqrt{1 + y'^2}. \quad (15)$$

Рівняння (14) після підстановки у нього (14), (15) та радіусу кривини (16):

$$r = \frac{(1 + y'^2)^{\frac{3}{2}}}{y''} \quad (16)$$

приймає вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dx} = \frac{k^{\sim} v_0}{v} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + y'^2}} - \mu \frac{y'}{\sqrt{1 + y'^2}} \right) \sqrt{1 + y'^2} - \\ - k^{\sim} \sqrt{1 + y'^2} - \frac{\mu y''}{(1 + y'^2)^{\frac{3}{2}}} v \sqrt{1 + y'^2}. \end{aligned} \quad (17)$$

Після спрощення маємо:

$$\frac{dv}{dx} = \frac{k^{\sim} v_0}{v} (1 - \mu y') - k^{\sim} \sqrt{1 + y'^2} - \frac{\mu y''}{1 + y'^2} v. \quad (18)$$

Якщо замість функції та аргументу підставити змінні, більші за вихідні у  $n$  разів, то рівняння (18) не зміниться. Це дає підставу вважати криву визначеною на проміжку  $(0;1)$  зі значенням  $h_y / h_x$  (рис. 2).

Таким чином задачу пошуку оптимальної форми напрямної  $S$  сформулюємо так: знайти функцію  $y(x)$ , визначену та принаймні двічі диференційовану на проміжку  $(0;1)$  з невід'ємними похідними та обмеженням  $y(x) \leq h_y / h_x$ , яка давала би мінімальне значення функціоналу

$$J(y(x)) = \left\{ \begin{array}{l} v(\min(1, x^*)) : \frac{dv}{dx} = \frac{k^{\sim} v_0}{v} (1 - \mu y') - \\ - k^{\sim} \sqrt{1 + y'^2} - \frac{\mu y''}{1 + y'^2} \cdot v, v(0) = v_0 \end{array} \right\}, \quad (19)$$

де  $x^*$  – абсциса точки де швидкість руху частки ґрунту дорівнює нулю, тобто  $v(x^*)=0$ .

**Висновки.** 1. Визначено функціонал (19) форми напрямної поверхні долота робочого органу чизельного знаряддя, на якій відносна швидкість руху частки ґрунту наприкінці другої фази взаємодії з поверхнею долота буде досягати мінімального значення.

2. Оскільки функціонал (19) є нелінійним, а використання стандартних методів варіаційного числення пошуку оптимального розв'язку є дуже складним, тому пошук оптимальної функції має бути здійснений серед поліномів.

### Література

1. Ghereș M.I. Mathematikal model for studying the influence of tillage tool

- geometry on energy consumption (*Model matematic pentru studiul influent geometriei sculelor de lucrat solul asupra consumului de energie*) INMATEH –Agricultural Engineering. Vol.42, No.1 /2014. pp. 5-12.
2. Oduma O., S.I. Oluka, J.C. Edeh. Development of empirical regression equations for predicting the performances of disc plough and harrow in clay-loam soil. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. Vol 21, No 3 (2019). pp. 18-25.
  3. Hill P.R., Stott D.E. Corn Residue Retention by a Combination Chisel Plow. *Soil Science Society of America Journal*. Volume 64 Issue 1, January 2000. pp. 293- 299.
  4. Караев О.Г., Матковський О.І., Кольцов М.П., Рубцов М.О. Моделювання форми поверхні розпушувача викопувального плуга саджанців плодкових культур. *Сучасні проблеми моделювання*: Мелітополь, 2019. С. 128-139.
  5. Голуб Г.А., Дворник А.В. Вплив конструкційно-технологічних параметрів агрегата для смугового обробітку ґрунту на грудкуватість. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. 2020. Вип. 27 (41). С. 89–98.
  6. Ветохін В.І. Системи та фізико-механічні основи проектування розпушувачів ґрунту: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.05.11 Глеваха, 2010. 40 с.

## **ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРАВЛЯЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ДОЛОТА РАБОЧЕГО ОРГАНА ЧИЗЕЛЬНОГО ОРУДИЯ**

Караев А.И., Матковский А.И. Чижиков И.А. Сушко С.Л.

*Применение чизельных орудий для обработки почвы получает все более широкое распространение в способах создания почвенных условий для развития растений. При этом, с целью снижения тягового сопротивления орудия проводятся исследования по определению оптимальных геометрических форм рабочих органов.*

*Орудия с чизельными рабочими органами применяются на почвах, в которых происходят проявления водных или воздушных эрозионных процессов, так как они способствуют созданию оптимального водно-воздушного режима почв с сохранением органических веществ в почве.*

*Чизельные орудие в своем составе имеют различные по своим конструктивным решениям и соответствующим параметрам рабочие органы, среди которых используется долото. Среди геометрических параметров долота чизельного рабочего органа определяющее значение имеет его форма поверхности, которая характеризует взаимодействие его с грунтом, при перемещении по поверхности. Чаще используют долото с по-*



*верхностью в виде плоскости, но такая форма, как показали предыдущие исследования, повышает усилия на перемещение отделенного пласта почвы. Поэтому задача оптимизации поверхности долота заключается в том, чтобы найти такую форму направляющей поверхности долота, которая обеспечит минимальную конечную скорость грунтовых агрегатов по его поверхности.*

*Предложена математическая модель формирования направляющей поверхности долота чизельного рабочего органа чизельного культиватора для обработки почвы. Доказано, что оптимальная форма направляющей поверхности долота должно обеспечивать минимальное значение относительной скорости частицы почвы по его поверхности в конце взаимодействия с рабочим органом. Получен функционал, который отражает произвольное множество на множестве действительных чисел, минимальное значение которого обеспечивает определение функции направляющей поверхности долота, где скорость частицы почвы равна нулю в конце взаимодействия с поверхностью. Отмечено, что методы вариационного исчисления поиска оптимального решения полученного функционала является очень сложным, поэтому поиск оптимальной функции будем искать среди полиномов.*

*Ключевые слова: чизельное орудие, рабочий орган, долото, направляющая, поверхность, параметры формы, относительная скорость, функционал, почва.*

## **GEOMETRIC MODELLING OF BIT SURFACE GUIDELINE OF CHISEL TOOL WORKING BODY**

Alexander Karaiev, Alexander Matkovskiy, Ivan Chyzykov, Sergii Sushko

*The mathematical model for shaping the guiding surface of the working body bit of chisel tool for soil cultivation has been proposed. It has also been indicated, that chisel tools application when growing crops contribute to the formation of appropriate conditions for plants growth and development .A significant effect from chisel tools application is being achieved on the soils having signs of water or air erosion processes due to creating the optimal water and air soil regime while maintaining stubble on the field surface.*

*Attention is drawn to the fact that in order to reduce the chisel tools traction resistance, considerable attention is paid to conducting research to define the optimal geometric parameters of the shape and position of their working bodies.*

*The working bodies of the chisel tools are equipped with chisels, having various design solutions with the corresponding geometric parameters of their shapes and positions. It has been proved that chisel tool traction resistance largely depends on the geometric parameters of the shape of the bit curved guide surface. Applying the bits having surface in the form of plane, as the pre-*

vious research showed, increases the effort to mode the separated soil layer from the massif.

It has been defined that the task of optimizing the parameters of the bits hape is to define such a bit shape, that it would provide a decrease in the initial alue of the relative velocity of the soil particle along its surface to the minimum value at its final movement along of the surface. By means of mathematical modelling of soil movement along the bit surface, non-linear functional has been obtained, that reflects and arbitrary vector set characterizes the interaction of a soil particle with the guide bit surface in the set of real numbers. The minimum value of a defined functional ensures the emergence of a continuous function of the guide surface of the bit, at which the velocity of the soil particle at the and of its interaction with the surface will be zero. It has been noted that the calculus of variations methods for finding the optimal solution of the obtained functional are very complicated, therefore, the search for the optimal function should be carried out among the polynomials.

*Key words:* chisel working body, bit, guide, surface, shape parameters, relative speed, functional, soil.

### **References**

1. Ghereș M.I. (2014) Matematikal model for studying the influence of tillage tool geometry on energy consumption (*Model matematic pentru studiul influent geometriei sculelor de lucrat solul asupra consumului de energie*) INMATEH –Agricultural Engineering, 42, 1, 5-12. [in English]
2. Oduma, O., Oluka, S.I., Edeh, J.C. (2019) Development of empirical regression equations for predicting the performances of disc plough and harrow in clay-loam soil. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 21, 3, 18-25 [in English]
3. Hill, P.R., Stott, D.E. (2000) Corn Residue Retention by a Combination Chisel Plow. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 1, January 2000. pp. 293- 299. [in English]
4. Karaev O.G., Matkovs'kij O.I., Kol'cov M.P., Rubcov M.O. (2019) Modeling the shape of the surface of the disintegrating plow of fruit seedlings. *Suchasni problemi modelyuvannya: Melitopol*, 128-139. [in Ukrainian]
5. Golub, G.A., Dvornik, A.V. (2020) Influence of structural and technological parameters of the unit for strip tillage on lumpiness. *Tekhniko-tehnologichni aspekti rozvitku ta viprobuvannya novoï tekhniki i tekhnologij dlya sil'skogo gospodarstva Ukraïni*, 27 (41), 89–98. [in Ukrainian]
6. Vetohin V.I. (2010) Systems and physical and mechanical bases of soil loosening design: Extended abstract of doctor's thesis: 05.05.11 Glevaha, [in Ukrainian]