

к. т. н., доцент, **А.В. Несвідомін**¹,

a.nesvidomin@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1495-1718

к. т. н., доцент, **Т.С. Пилипака**²,

t.s.pylypaka@nuwm.edu.ua, [https:// ORCID 0009-0000-5582-1859](https://orcid.org/0009-0000-5582-1859)

д. т. н., проф. **Несвідомін В.М.**¹,

vnesvidomin@nubip.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1495-1718

к. т. н., доцент, **І.Ю. Грищенко**¹,

irgr@yahoo.com, ORCID 0000-0002-1000-

к. т. н., доцент, **В.М. Бабка**¹,

babkavitaliy@ukr.net, ORCID 0000-0003-4971-4285,

¹Національний університет біоресурсів і природокористування
України

²Національний університет водного господарства та
природокористування

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКЕ ЗНАРЯДДЯ ДЛЯ ПОВЕРХНЕВОГО ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ

Об'єктом дослідження є процес знаходження раціональної форми ґрунтообробного робочого органу барабанного типу на предмет зменшення опору при його заглибленні у ґрунт. Робочі органи сільськогосподарських знарядь мають різну форму: пружинні зуби, ножі, фрези, долота, лапи, диски. Всі вони взаємодіють із ґрунтовим середовищем, причому можуть бути активними або пасивними. Однак як в першому, так і у другому випадку опір їхньому переміщенню має бути мінімальним. В статті розглянуто форму криволінійного зуба, який нерухомо закріплений між двома циліндричними дисками, які утворюють секцію. Декілька секцій, закріплених на валу, можуть утворювати барабан. Таке знаряддя може працювати подібно до борончастого котка або голчастої борони, коли при їх перекочуванні криволінійний зуб примусово занурюється в ґрунт з наступним його розпушуванням. Пропонується така криволінійна форма зуба, яка б працювала подібно до лопати: на першому етапі занурення в ґрунт максимально ковзала по ньому і мінімально його деформувала, а на другому – виважувала його і перевертала. Такий процес деформації ґрунту має знизити опір його обробітку на першому етапі, чим і зумовлює актуальність досліджень.

Метою роботи є встановлення аналітичного опису форми криволінійного зуба або лопатки, які при зануренні у ґрунт максимально ковзали б вздовж самих себе, тим само зменшуючи опір зануренню. Для цього було проаналізовано роботу зуба прямолінійної форми з наступною його трансформацією у криволінійну згідно поставленої задачі. Такою

кривою профілю зуба виявилася евольвента кола, яка відома іншим своїм технічним застосуванням, як профіль зубця у циліндричних передачах. Траєкторією точки кріплення зуба до дисків є циклоїда, а його кінець – подовжена циклоїда. Частина петлі подовженої циклоїди у ґрунтовому середовищі утворює область обробленого ґрунту. Для будь-якої форми зуба, в тому числі прямолінійного, його кінець описує подовжену циклоїду, але для зуба у формі евольвенти кола є особливість. Вона полягає в тому, що в момент контакту зуба із поверхнею поля вектор абсолютної швидкості спрямований перпендикулярно до нього. По мірі перекочування дисків зуб занурюється в ґрунт, причому точка входження в нього залишається незмінною, а сам зуб ковзає практично сам вздовж себе, особливо у верхніх шарах ґрунту. Після занурення на максимальну глибину він починає виважувати ґрунт на поверхню або розпушувати нього. В статті встановлено аналітичні залежності, наведено графічні ілюстрації в масштабі, що дає уявлення про роботу робочого органу та профілю обробленого ґрунту. Такий результат дає можливість робити потрібні розрахунки, що надає роботі практичної цінності.

Ключові слова: занурення в ґрунт, форма зуба, найменший опір, ковзання, евольвента кола.

Вступ. В сільськогосподарських машинах використовується велика кількість ґрунтообробних знарядь. Їх форма залежить від призначення і принципу дії. В боронах призначення робочих органів – розрівнювання, перемішування і розпушування ґрунту, знищення бур'янів. В культиваторах – передпосівний і післясходовий обробіток ґрунту, його розпушування, перемішування і підготовка до сівби або догляду за посівами. В котках – руйнування ґрунтової кірки, грудок, розпушування, вирівнювання і ущільнення поверхні ґрунту. У фрезах – для розпушування, перемішування і вирівнювання ґрунту. За принципом дії вони є пасивними (борони, котки, культиватори) і активними (фрези). Важливою характеристикою роботи ґрунтообробного агрегату є тяговий опір, від якого залежить витрата паливо-мастильних матеріалів. Ґрунтообробні агрегати повинні якісно виконувати свою роботу із дотриманням агротехнічних вимог і при цьому мати мінімально можливий тяговий опір. В роботі розглянуто форму криволінійного робочого органу, який може використовуватися як пасивний орган барабанного типу за умови, що він чинить мінімально можливий опір при примусовому зануренні у ґрунт. Такі робочі органи можуть впливати на зменшення тягового опору агрегату, що робить дослідження актуальними.

Огляд літератури і постановка проблеми. Зважаючи на важливість конструювання і вдосконалення робочих органів ґрунтообробних агрегатів існує багато досліджень у цьому напрямі. Забезпеченню ефективності робочих органів культиваторів присвячена монографія [1]. Проектування

поверхонь робочих органів машин, які взаємодіють з ґрунтом, розглянуто в праці [2]. Деякі автори вдаються при цьому до аналогій в живій природі, використовуючи біологічний прототип [3]. Силу взаємодії робочого органу із ґрунтовим середовищем розглянуто в праці [4], а в праці [5] ця взаємодія моделюється із застосуванням спеціального програмного забезпечення. При цьому також приділяється увага довговічності робочих органів та їх зносостійкості [6], а також впливу робочих органів з поверхневим зміцненням на величину тягового опору [7]. Зношення поверхні ґрунтообробного органу у великій мірі залежить від ступеня закріплення абразивної частинки в ґрунті. В праці [8] зазначається, що в багатьох випадках взаємодія поверхні робочих органів з ґрунтом переважає інтенсивність всіх інших процесів, які там відбуваються. В результаті взаємодії робочого органу із ґрунтовим середовищем наявні три види тертя, тобто тертя ковзання, тертя кочення та тертя кочення з проковзуванням [9]. У зв'язку із цим в працях [10, 11] розглянуто питання збільшення ресурсу робочих органів за рахунок нанесення на їх поверхню зносостійких покриттів.

Впровадження в сільськогосподарське виробництво ґрунтозберігаючих, енергоощадних та інноваційних технологій обробки ґрунту ставить задачу розробки комбінованих агрегатів та вдосконалених робочих органів до них. В статті [12] розглядаються шляхи зниження енергозатрат на обробку ґрунту на основі математичного моделювання та аналізу зв'язків між елементами агрегату. Ще один напрямок створення високопродуктивних агрегатів – врахування фізичних принципів взаємодії робочих органів із ґрунтовим середовищем. Для цього в праці [13] вводиться поняття енергетичного стану елементарного об'єму ґрунтового середовища та його аналітичний опис. Про експериментальне дослідження роботи глибокорозпушувача у ґрунтовому каналі йдеться у статті [14]. Дослідження робочих органів із гвинтових поверхонь здійснено в працях [15, 16]. В праці [17] здійснено аналітичний опис взаємодії дискового сферичного органу із ґрунтовим середовищем. При використанні різних робочих органів і ґрунтообробних агрегатів зменшення тягового опору є актуальним завданням. В цьому відношенні форма робочого органу відіграє важливу роль.

Мета і задачі дослідження.

Мета роботи: розробити аналітичний опис форми криволінійного зуба або лопатки, які при зануренні у ґрунт максимально ковзали б вздовж самих себе, тим само зменшуючи опір зануренню.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

– на основі аналітичного підходу знайти раціональну форму ґрунтообробного робочого органу у вигляді зуба або лопатки, який би мав мінімальний опір при зануренні у ґрунт;

– дослідити чинники, які впливають на опір зануренню робочого органу та обґрунтувати його конструктивні параметри для зменшення опору і зносу робочої поверхні.

Матеріали та методи проведення досліджень.

Матеріали досліджень ґрунтуються на теорії диференціальної геометрії кривих та їх властивостей. Зокрема, використовувалися формули для переходу від рівняння кривої у полярних координатах до параметричних рівнянь у декартових координатах. Для знаходження абсолютної швидкості точок робочого органу, який одночасно здійснює два рухи (обертальний і поступальний), використовувалися методи теоретичної механіки та векторної алгебри. Цими ж методами було здійснено розкладання вектору абсолютної швидкості на складові, за якими можна судити про інтенсивність зносу робочого органу по ходу його занурення у ґрунт. Методи аналітичної геометрії використовувалися для знаходження кутів між векторами.

Результати досліджень знаходження раціональної форми ґрунтообробного робочого органу та обґрунтування його конструктивних параметрів

Аналітична умова переходу від прямолінійної форми та знаходження криволінійної форми ґрунтообробного робочого органу барабанного типу

Розглянемо робочий орган у вигляді прямолінійної лопатки, жорстко прикріпленої в радіальному напрямі до барабана радіуса r (рис. 1,а). При перекочуванні барабана по поверхні ґрунту без ковзання його поступальна швидкість V_e визначиться через кутову швидкість ω обертання барабана радіуса r : $V_e = r \cdot \omega$. Траєкторією руху точки D буде циклоїда, для решти точок лопатки – подовжені циклоїди. Форма циклоїди залежить від відстані ρ від центра обертання O до точки на лопатці і описується параметричними рівняннями:

$$x = r \left(\alpha - \frac{\rho}{r} \sin \varphi \right); \quad y = r \left(1 - \frac{\rho}{r} \cos \varphi \right),$$

(1)

де φ – незалежна змінна – кут повороту точки кола навколо його центру O .

За рівняннями (1) на рис. 1,б побудовані траєкторії руху точок D , B , C лопатки. При $\rho=r$ буде циклоїда, яка є траєкторією точки D , для решти точок, в тому числі B і C – подовжені траєкторії.

При обертанні барабана першою в контакт із ґрунтом вступає точка C . З цього моменту починається ущільнення ґрунту, яке зрештою призводить до його виваження на поверхню. Очевидно, що на лопатку діють великі сили опору. Поставимо задачу деформувати прямолінійну лопатку у криволінійну таким чином, щоб на етапі занурення у ґрунт вона

максимально можливо ковзала вздовж самої себе, а потім відбувалося виваження ґрунту на поверхню подібно до роботи лопати.

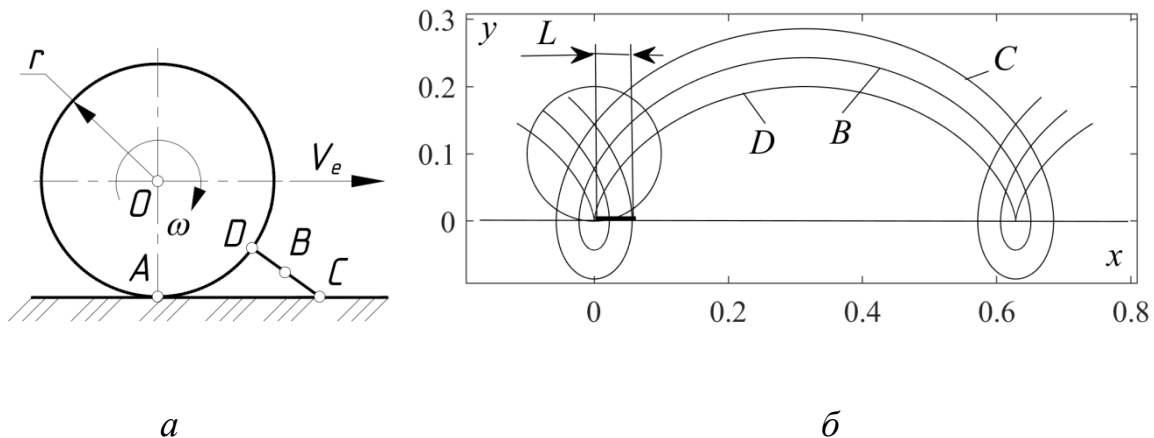


Рис. 1. Графічні ілюстрації до побудови траєкторій точок лопатки при коченні барабана без ковзання:

- а) барабан із жорстко закріпленою до нього прямолінійною лопаткою в радіальному напрямі; б) траєкторії руху окремих точок лопатки

Із рис. 1, б видно, що різниця у відстані між точками D і C на поверхні ґрунту становить $L=r\cdot\varphi$, де φ – кут, на який повернувся барабан з моменту вступу точки C до моменту вступу точки D на поверхню ґрунту. Поставимо задачу таким чином деформувати лопатку, щоб відстань L була рівною нулю, тобто щоб всі точки лопатки входили в ґрунт в одній і тій же точці. Відстань L дорівнює приросту координати x , отже при $y=0$ потрібно знайти відповідний вираз кута φ для криволінійної лопатки. Для цього прирівнюємо другий вираз рівнянь (1) до нуля і знаходимо наступні вирази:

$$\varphi = \text{Arccos} \frac{r}{\rho}; \quad \sin \varphi = \frac{1}{\rho} \sqrt{\rho^2 - r^2}. \quad (2)$$

Підставимо у перше рівняння (1) $x=L=r\cdot\varphi$ і вирази (2). Після цього отримаємо наступне рівняння:

$$\varphi = \text{Arccos} \frac{r}{\rho} - \frac{1}{r} \sqrt{\rho^2 - r^2}. \quad (3)$$

Рівняння (3) є рівнянням $\varphi=\varphi(\rho)$ в полярних координатах. Перехід до параметричних рівнянь в декартових координатах здійснюємо за відомими формулами $x=\rho\cdot\cos\varphi$, $y=\rho\cdot\sin\varphi$.

Після підстановки і перетворень ми отримаємо параметричні рівняння кривої, для якої незалежною змінною є ρ – відстань від початку координат до поточної точки кривої:

$$\begin{aligned}
 x &= r \cos \frac{\sqrt{\rho^2 - r^2}}{r} + \sqrt{\rho^2 - r^2} \sin \frac{\sqrt{\rho^2 - r^2}}{r}; \\
 y &= r \sin \frac{\sqrt{\rho^2 - r^2}}{r} - \sqrt{\rho^2 - r^2} \cos \frac{\sqrt{\rho^2 - r^2}}{r}.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Введемо нову змінну α , таку що $\sqrt{\rho^2 - r^2}/r = \alpha$. Тоді параметричні рівняння (4) набувають вигляду:

$$\begin{aligned}
 x &= r \cos \alpha + r \alpha \sin \alpha; \\
 y &= r \sin \alpha - r \alpha \cos \alpha.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Параметричні рівняння (5) є відомими рівняннями евольвенти кола радіуса r . На рис. 2 побудовано коло радіуса r і дуга евольвенти в початковому положенні (рис. 2,а) і після того, як коло, котячись без ковзання по поверхні поля, займе нове положення разом із жорстко прикріпленою до нього дугою евольвенти (рис. 2,б), яку вважатимемо робочим органом (лопаткою).

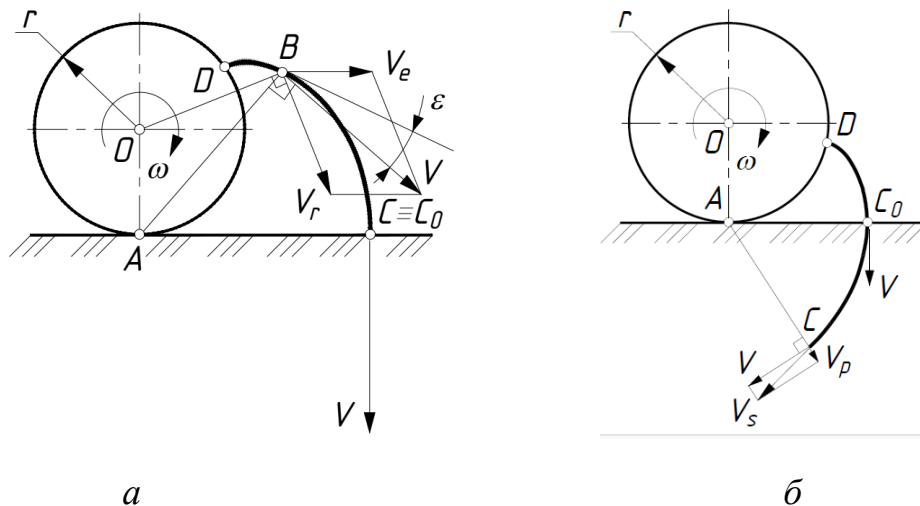


Рис. 2. Коло радіуса r (барaban) і жорстко прикріплена до нього лопатка, що має форму евольвенти:

- а) початок лопатки (точка C) в момент входження в ґрунтовий масив;
- б) лопатка після входження в ґрунтовий масив на певну глибину

Властивістю евольвенти є те, що довжина відрізка AC дорівнює довжині дуги кола AD (рис. 2, а). В результаті цього при коченні кола і одночасному зануренні лопатки у ґрунт, наступить момент, коли точка D попаде в точку C_0 на поверхні ґрунту, де до того був її початок. Це стосується не тільки точки D , а всіх точок евольвенти, тобто вона входить у ґрунт в одному і тому самому місці (рис. 2, б), причому перпендикулярно до поверхні поля. Це зумовлено тим, що точка A є миттєвим центром обертання і вектор V швидкості перпендикулярний до відрізка, який сполучає точку A з точкою евольвенти на поверхні поля. В цілому цей вектор є сумою двох складових: поступального переміщення $V_e = r \cdot \omega$ і

обертального $V_r = OB \cdot \omega = \rho \cdot \omega$. Вектор швидкості V складає із дотичноє до евольвенти певний кут ε (рис. 2,б), який дорівнює нулю тільки в точці C_0 . Через цей кут швидкість V можна розкласти на V_s (швидкість ковзання) і V_p (швидкість в перпендикулярному напрямі, від величини якої залежить тиск ґрунту на поверхню).

5.2. Дослідження чинників, які впливають на опір зануренню робочого органу та обґрунтування його конструктивних параметрів

Знайдемо величину дуги евольвенти для заданої глибини обробітку ґрунту. При перекочуванні кола разом із евольвентою відстань від центра обертання O до почату лопатки C не змінюється. Отже відстань OC є сумою $r+h$, де h – глибина обробітку. З іншої сторони, відстань $OC = \rho$ можна визначити до будь-якої точки евольвенти (5) за відомою формулою. На основі цього знаходимо залежність:

$$r + h = \sqrt{1 + \alpha^2}. \quad (6)$$

Із (6) випливає, що задану глибину h обробітку ґрунту можна забезпечити при різних комбінаціях радіуса r і кінцевого значення кута $\alpha = \alpha_0$ в точці C . Наприклад, при $r = 0,01$ м і $\alpha_0 = 0,5 \cdot \pi$ глибина обробітку ґрунту становить $h = 0,086$ м.

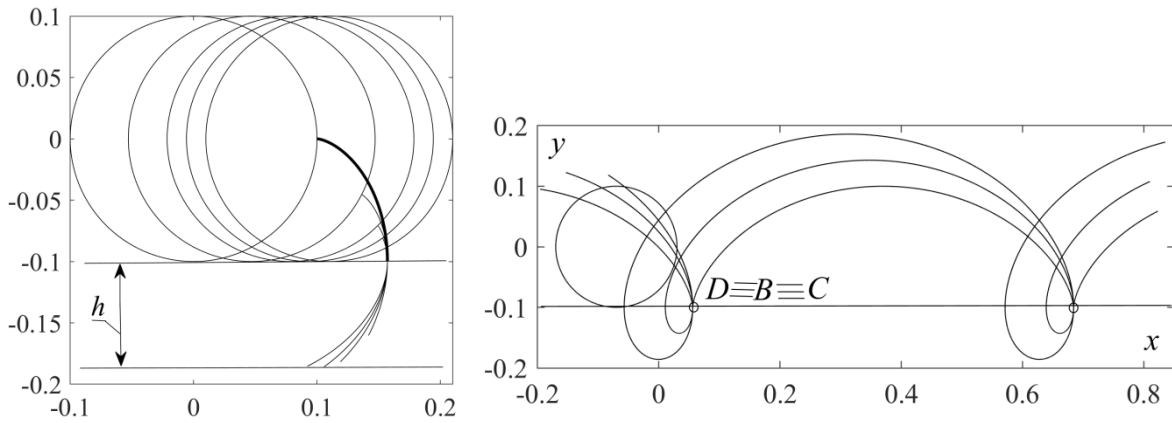
Прослідкуємо окремі положення криволінійної лопатки при її поступовому зануренні у ґрунт. Для цього складемо параметричні рівняння, які описують її поворот на кут α_t і відповідне лінійне переміщення на відстань $r \cdot \alpha_t$:

$$\begin{aligned} x_t &= r \cos(\alpha + \alpha_t) + r \alpha \sin(\alpha + \alpha_t) + r \alpha_t; \\ y_t &= -r \sin(\alpha + \alpha_t) + r \alpha \cos(\alpha + \alpha_t). \end{aligned} \quad (7)$$

При $\alpha_t = 0$ і зміні кута α в межах $\alpha = 0 \dots 0,5 \cdot \pi$ ми отримуємо початкове положення лопатки на (рис. 3, а) її початкове положення показано потовщеною лінією. Повне занурення лопатки відбувається при $\alpha_t = 0,5 \cdot \pi$. Візуалізація і аналіз поступового занурення лопатки в ґрунт при збільшенні дискретних значень α_t показали, що заданої глибини початок лопатки (точка C) досягає раніше, ніж точка D попаде в точку C_0 на поверхні поля. Заданої глибини h точка C лопатки досягає при $\alpha = 0,3 \cdot \pi$.

Це означає, що лопатка ще не занурилася повністю в ґрунт, однак її початок (точка C) уже досягла заданої глибини і після цього починається виваження ґрунту.

На рис. 3, б зображені траєкторії руху окремих точок лопатки. Для їх побудови рівняння (1) не використовувалися, оскільки в них збільшення радіуса ρ відбувається в радіальному напрямі, що характерно для прямолінійної лопатки. Для криволінійної лопатки координати кожної точки потрібно шукати за рівняннями (5) при певному значенні кута $\alpha = \alpha_c$, а потім будувати їх траєкторії за умови, що вони жорстко прикріплені до кола.



a

б

Рис. 3. Графічні ілюстрації до руху криволінійної лопатки (евольвенти кола) при коченні барабана по поверхні поля без ковзання:

а) послідовне переміщення барабана і занурення лопатки в ґрунт;

б) траєкторії руху окремих точок лопатки

Із врахуванням цього параметричні рівняння циклоїди конкретної точки евольвенти, що відповідає значенню кута $\alpha = \alpha_c$, запишуться:

$$\begin{aligned} x_c &= r \cos(\alpha + \alpha_c) + r\alpha_c \sin(\alpha + \alpha_c) + r\alpha; \\ y_c &= -r \sin(\alpha + \alpha_c) + r\alpha_c \cos(\alpha + \alpha_c). \end{aligned} \quad (8)$$

Для траєкторії точки *C* відповідає кут $\alpha_c = 0,5 \cdot \pi$, траєкторії точки *D* – кут $\alpha_c = 0$. Траєкторії всіх інших точок можна побудувати при значеннях кута α_c із вказаного проміжку. Із рисунка видно, що всі точки лопатки входять в ґрунт в одному і тому ж місці.

Опір зануренню лопатки в ґрунт має дві складові: опору проникнення леза (точки *C*) в ґрунт і опору сил тертя, що діють на поверхню лопатки внаслідок того, що вектор швидкості *V* точки не збігається із дотичною до лопатки в цій точці. Між ними існує кут ε (рис. 2, *a*). Цей кут рівний нулю тільки в точці входження лопатки в ґрунт. В цій точці тиск на бічну поверхню лопатки мінімальний, оскільки лопатка ковзає вздовж самої себе. В подальшому кут ε зростає, отже зростає і сила тертя. Однак вона залежить ще і від швидкості *V*, яку потрібно через цей кут розкласти на дві складові: V_s і V_p (рис. 2, *б*).

На рис. 4,а побудовані окремі положення криволінійної лопатки при її зануренні у ґрунт за рівняннями (7) та ділянка траєкторії її леза (точки *C*) за рівняннями (8). Після занурення лопатки у ґрунт, коли починається його виваження, кут ε починає стрімко зростати.

Знаючи траєкторію руху будь-якої точки лопатки згідно рівнянь (8), можна знайти її швидкість *V* у функції змінної α – кута повороту кола радіуса *r* (барабана). Запишемо: $V = ds/dt = ds/da \cdot da/dt = \omega \cdot ds/da$, де *s* – довжина траєкторії.

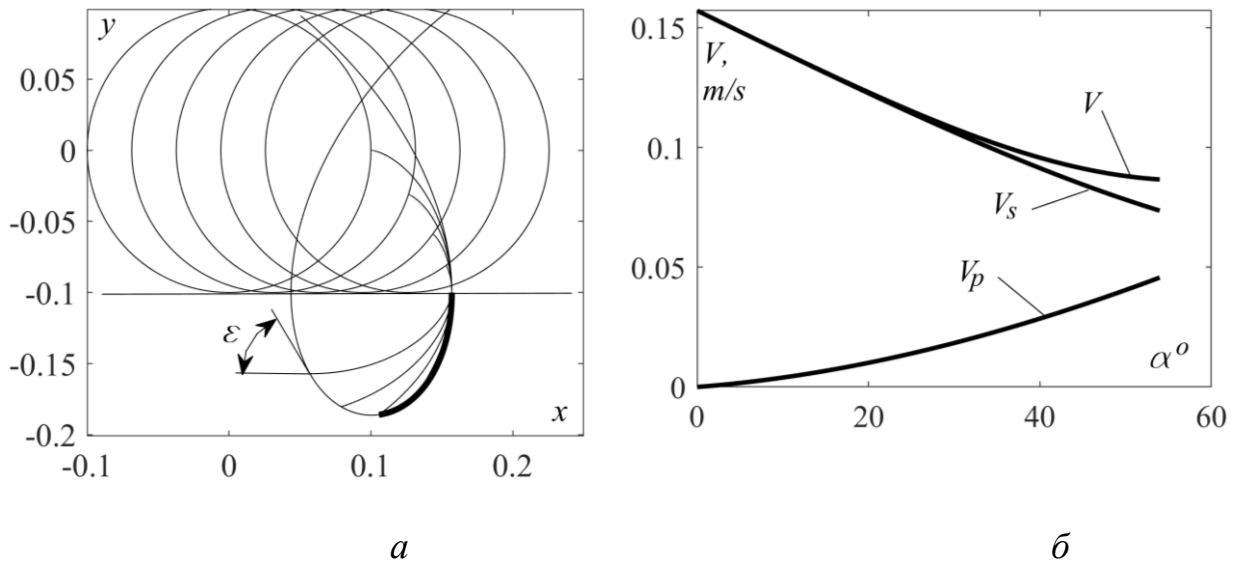


Рис. 4. Графічні ілюстрації до кінематичних характеристик руху криволінійної лопатки при зануренні її на максимальну глибину при $\alpha=0,3\cdot\pi=54^\circ$:

- а) окремі положення лопатки при її зануренні у ґрунт та траєкторія леза;
 б) графіки швидкості V та її розкладання на V_s і V_p

Кутову швидкість обертання диска приймаємо $\omega=1$, оскільки це не впливає на траєкторію і на загальні геометричні закономірності. Швидкість V переміщення точки лопатки знаходимо через похідні її траєкторії (8):

$$V_{\omega=1} = \frac{ds}{d\alpha} = \sqrt{x_c'^2 + y_c'^2} = r\sqrt{2 + \alpha_c^2 + 2\alpha_c \cos(\alpha + \alpha_c) - 2\sin(\alpha + \alpha_c)}. \quad (9)$$

Кут ε в точці C_o входження леза лопатки в ґрунт дорівнює нулю. Він рівний нулю для всіх точок лопатки, які входять у ґрунт в цій точці. Однак по мірі заглиблення він зростає. Знайдемо закономірність його зростання для леза лопатки (точки C). Кут ε є кутом між дотичною до її траєкторії (8) при $\alpha_c=0,5\cdot\pi$ і дотичною до лопатки (7) в точці C при $\alpha_t=0,5\cdot\pi$. Одиничний вектор дотичної до траєкторії руху точки C знаходимо диференціюванням рівнянь (8) з наступним їх діленням на вираз швидкості (9). Одиничний вектор дотичної до лопатки (7) в точці C по відношенню до неї нерухомий, але рухається разом із нею і має координати:

$$\left\{ \frac{r\alpha - \sin \alpha}{\sqrt{(r\alpha - \sin \alpha)^2 + \cos^2 \alpha}}; \quad -\frac{\cos \alpha}{\sqrt{(r\alpha - \sin \alpha)^2 + \cos^2 \alpha}} \right\}. \quad (10)$$

Знайшовши одиничні вектори дотичних до траєкторії леза і до евольвенти в точці C (початку лопатки, тобто леза), знаходимо кут ε між ними (виразу кута не наводимо із-за його громіздкого вигляду). Складові V_s і V_p визначаються через кут ε : $V_s=V\cdot\cos\varepsilon$, $V_p=V\cdot\sin\varepsilon$. На рис. 4, б побудовані графіки швидкості V і її складових в залежності від кута α , тобто від занурення точки C (леза лопатки) на глибину h . Із нього видно, що більшу частину шляху при зануренні лопатки в ґрунт вона ковзає

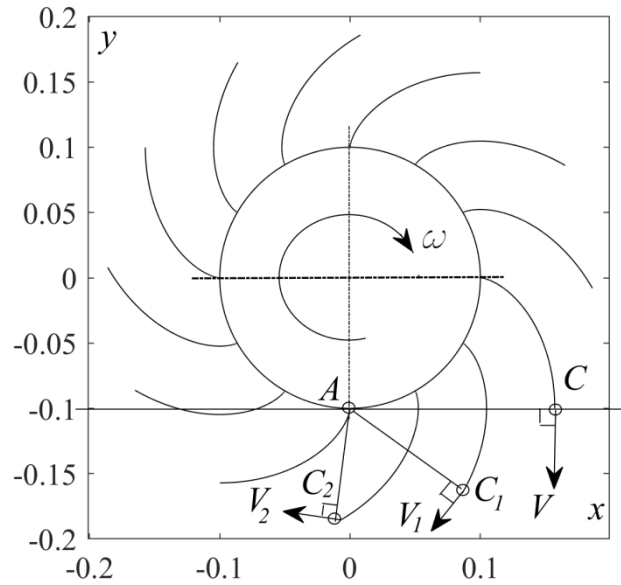
вздовж самої себе, оскільки швидкості V_s і V збігаються. Саме на цій ділянці відбувається мінімальне стирання бічних поверхонь лопатки, ефективно їх самоочищення і зниження енергомосткості процесу. Отже доцільно скоротити довжину лопатки, тоді вона не буде доходити до глибини, де починається значний тиск на бічну поверхню лопатки, що спричинює відповідне тертя і її знос. Але при цьому зменшиться глибина обробітку. Щоб цього не сталося, потрібно збільшити радіус r барабана. Отже в залежності (6) при заданій глибині h радіус r потрібно брати якомога більшим. Цим двом вибраним параметрам (h і r) відповідатиме кут $\alpha = \alpha_o$, знайдений із залежності (6). Щоб побудувати лопатку за рівняннями (5), незалежна змінна α повинна змінюватися в межах $\alpha = 0 \dots \alpha_o$.

Обговорення отриманих результатів для проектування робочого органу сільськогосподарських знарядь

Серед різноманітних ґрунтообробних робочих органів є зуби, подібні за формою до розглянутих в цій статті. Це стосується ротоваторів [18], які є ґрунтообробним знаряддям як для мотоблоків, так і для потужних тракторів (рис. 5, а). Принциповою відмінністю є те, що вони не розраховані на заглиблення в ґрунт через співвідношення обертальної і поступальної швидкостей. Вони працюють, як активні робочі органи, привід яких здійснюється від двигуна мотоблока або валу відбору потужності трактора подібно до фрез. Миттєвого центру обертання, як точка A на рис. 5, б для ротоваторів не існує. На рис. 5, б також пояснюється зменшення швидкості V леза (точки C) по мірі його занурення у ґрунт (рис. 4, б). При сталій кутовій швидкості ω обертання барабана величина миттєвого радіуса AC зменшується, отже зменшується швидкість, як добуток цих величин. При $\omega = 1$ і $r = 0,1$ м можна знайти швидкість леза в момент зустрічі із поверхнею поля. У цьому випадку $AC = r \cdot \alpha_o = \pi \cdot r / 2 = 0,16$ м. Отже, $V = \omega \cdot AC = 0,16$ м/с.

Якщо лопатки ротоватора перемішують ґрунт, то лопатки запропонованого знаряддя входять в нього через певну відстань, величина якої залежить від кількості лопаток у секції. На рис. 6 побудовані окремі положення двох лопаток, загальна кількість яких в секції дорівнює шести. Лезо (початок лопатки) і її кінець рухаються по циклоїдах (звичайна і подовжена), а між ними розташовуються проміжні положення лопатки. В межах подовжених циклоїд знаходяться ділянки обробленого ґрунту. Як видно із рис. 6, при заданій глибині обробки h є ділянки із значно меншою глибиною, ніж задана, оскільки профіль необробленого ґрунту утворений заглибленнями і гребнями.

Можна зменшити висоту гребнів, збільшивши у секції число лопаток, наприклад, до 12 (рис. 5, б).



a

б

Рис. 5. Ротатор та схема секції альтернативного ґрунтообробного знаряддя: а) ротатор для агрегування із мотоблоком; б) схема секції ґрунтообробного знаряддя із 12 лопатками

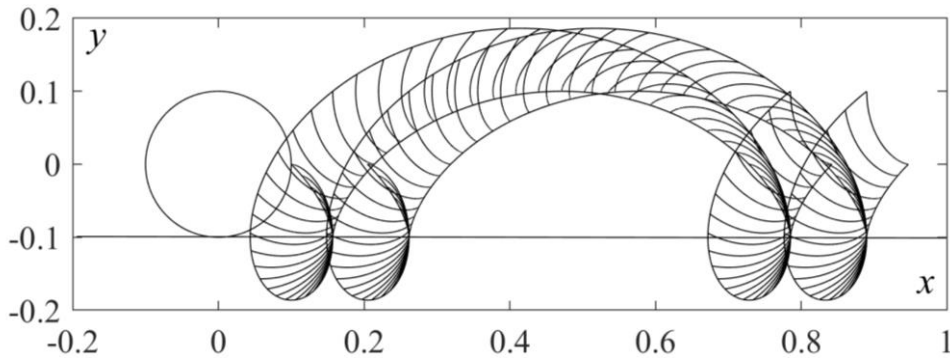


Рис. 6. Проміжні положення лопаток при обертанні барабана, які розташовані між траєкторіями їх кінців

На рис. 7 запропонована схема кріплення лопаток на окремій секції, яка одягається на шестигранну трубу і кріпиться до неї. Лопатки можна затиснути між двома дисками радіуса r , які служать опорними колесами або барабаном. Із точок на опорному колесі починається криволінійна лопатка у формі евольвенти кола, вісь якої зображена штрих-пунктирною лінією. Таких секцій на шестигранній трубі, яка є валом, можна закріпити необхідну кількість.

Занурення лопаток у ґрунт має відбуватися під дією ваги ґрунтообробного агрегату. Очевидно, що це є обмеженням на глибину обробки. Штучне довантажування агрегату баластом буде призводити до зростання енергоємності процесу.

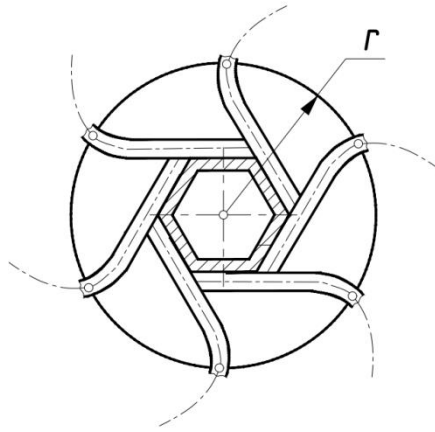


Рис. 7. Можливий варіант утворення секції із шістьма лопатками, закріпленими на валу у вигляді шестигранної труби

Недоліком є те, що збільшення глибини обробки потрібно збільшувати довжину ґрунтообробних лап. Але, по-перше, це призводить до зростання опору зануренню лап, а по друге, щоб зменшити цей опір, потрібно збільшувати радіус опорних коліс або барабана. Подальший розвиток дослідження може бути спрямований на знаходження іншої форми лапи, позбавленої вказаних недоліків.

Висновки та перспективи.

1. Аналіз прямолінійної лопатки, встановленої на барабані ґрунтообробного знаряддя в радіальному напрямі показав, що занурення такої лопатки у ґрунт є енергозатратним, оскільки на цьому етапі відбувається деформація ґрунту. Трансформація прямолінійної лопатки у криволінійну здійснена на основі умови її входження у ґрунт в одній і тій же точці. Математичний опис такої лопатки показав, що вона повинна мати профіль евольвенти кола – перерізу барабана, до якого кріпиться лопатка. При зануренні у ґрунт така лопатка максимально ковзає вздовж самої себе, особливо у верхніх шарах ґрунту, і тільки після занурення на всю глибину починає виважувати ґрунт на поверхню. Це відбувається в результаті двох переміщень барабана із лопаткою: поступального в напрямку руху агрегату і обертального навколо осі барабану.

2. У момент входження в ґрунт вектор швидкості леза лопатки збігається із вектором дотичної до неї в точці леза. Це означає, що в цей момент основні зусилля спрямовані на подолання опору проникнення леза у ґрунт. По мірі занурення лопатки ці два вектори утворюють певний кут, який зростає із глибиною занурення. Виникає ще одна складова опору тертя внаслідок тиску ґрунту на бічну поверхню лопатки. Оцінити динаміку цього опору можна розкладанням вектора швидкості руху леза вздовж дотичної до нього і в перпендикулярному напрямі. Побудований графік показує, що по мірі занурення тиск ґрунту на бічну поверхню лопатки зростає за залежністю, подібною до квадратичної, що спричинює її знос в нижніх шарах ґрунту. Зменшити знос можна зменшенням

довжини лопатки, однак при цьому зменшується глибина обробітку. Можна збільшити радіус барабана і належним чином збільшити довжину лопатки, щоб глибина обробітку не змінилася. При цьому кривина лопатки буде іншою і опір тертя в нижніх шарах ґрунту зменшиться. Таким чином, для лопатки, кривина якої залежить від барабана, його радіус потрібно брати якомога більшим. Це сприятиме тому, що лопатка на етапі занурення максимально ковзатиме вздовж самої себе.

Література

1. Козаченко О.В., Шкрегаль, О.М., Каденко В.М. Забезпечення ефективності робочих органів культиваторів: монографія. Харків, ПромАрт, 2021. 238 с.
URL: https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/21300/1/zabezpechenny_a_efektyvnosti_robochykh_orhaniv_monhraf_2021.pdf
2. Караєв О. Г., Матковський, О.І., Чижиков І.О., Рубцов Н.О. Проектування поверхонь робочих органів машин, які взаємодіють з ґрунтом. Сучасні проблеми моделювання. 2020. Вип. 19. С. 70 –78. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/cpm_2020_19_11
3. Михайлов Є.В, Волик Б.А., Теслюк Г.В., Коновий А.В. Обґрунтування конструктивної схеми стрільчастої лапи на основі біологічного прототипу. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2019. Вип. 19, Т.3. –С. 37-46 (DOI :10.31388/2078-0877-19-3-37-45)
4. Козаченко, О., Сєдих, К., & Волковський, О. (2023). Теоретичний аналіз силової взаємодії дискового робочого органу з ґрунтовим середовищем. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Вип. 13(1). Режим доступу: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/357>
5. Kobets, A., Aliiev, E., Tesliuk, H., & Aliieva, O. (2023). Simulation of the process of interaction of the working bodies of tillage machines with the soil in Simcenter STAR-CCM+. *Machinery & Energetics*, 14(1), 9-23. Режим доступу: <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2023.09>
6. Захаров, А., Рибалко, І., Тіхонов, О., & Сайчук, О. (2023). Дослідження зношуючої здатності ґрунтів та її вплив на довговічність робочих органів ґрунтообробних машин. *Науковий вісник Таврійського державного*

агротехнологічного університету. Вип. 13(1). Режим доступу: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/359>

7. D. O. Buslaiev, & M. O. Vasylenko (2020). Traction resistance of cultivator paws with surface hardening during operation of tillage machines. *Machinery & Energetics*, 11(1), 177-182. Режим доступу: <https://technicalscience.com.ua/uk/journals/t-11-1-2020/tyagoviy-opir-kultivatornikh-lap-z-povyerkhnyevim-zmitsnyennyam-pri-yekspluatatsiyi-gruntoobrobnykh-mashin>

8. K. V. Borak (2020). Influence of degree of abrasive particle clinging to wear mechanism of soil-cultivating machines operational mechanisms. *Machinery & Energetics*, 11(2), 35-40. Режим доступу: <https://technicalscience.com.ua/uk/journals/t-11-2-2020/vpliv-stupenyazakriplyennya-abrazivnoyi-chastinki-na-myekhanizm-znoshuvannya-robochikh-organiv-gruntoobrobnykh-mashin>

9. K. V. Borak (2019). Frictional interaction between soil and surface of tilling machine movable operating parts. *Machinery & Energetics*, 10(4), 157-162. Режим доступу: <https://technicalscience.com.ua/uk/journals/t-10-4-2019/friktsiyyna-vzayemodiya-gruntu-z-povyerkhnyeyu-robochikh-organiv-gruntoobrobnykh-mashin>

10. Yu. B. Paladiychuk, & Ju. M. Melnik (2021). Restoration resource of working bodies of soil treatment machines by applying wear-resistant coatings. *Machinery & Energetics*, 12(4), 43-52. Режим доступу <https://technicalscience.com.ua/en/journals/t-12-4-2021/vidnovlyennya-ryesursu-robochikh-organiv-gruntoobrobnykh-mashin-nanyesyennyam-znosostiykikh-pokrit>

11. К. В. Борак . Забезпечення рівностійкості зношування робочих органів ґрунтообробних машин. *НаукПраці ВНТУ*. Вип. 1, Бер 2022. Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/650>

12. L. P. Sereda, & D. A. Kovalchuk (2021). Mathematical modeling soil tilling unit in the system "Soil-aggregate-energy means" for strip-till technology soil treatment. *Machinery & Energetics*, 12(4), 103-108. Режим доступу: <https://technicalscience.com.ua/uk/journals/t-12-4-2021/matyematchnyemodyelyuvannya-gruntoobrobnoho-agryegatu-v-sistyemi-grunt-agryegatyenyergyetichniy-zasib-dlya-strip-till-tyekhnologiyi-obrobitku-grunt>

13. I. M. Sivak, Yu. V. Chovnyuk, & Yu. O. Gumenyuk (2019). Substantiation of basic principles of creation of high-efficiency soilprocessing technology for agricultural appointment. *Machinery & Energetics*, 10(1), 171-175. URL: <https://technicalscience.com.ua/uk/journals/t-10-1-2019/obgruntuvannya-osnovnikh-printsipiv-stvoryennya-visokoproduktivnoyi-gruntoobrobnoyi-tyekhniki-silskogospodarskogo-priznachuennya>
14. Чижиков, І. (2023). Дослідження процесу створення смугової гряди робочим органом глибокорозпушувача в умовах ґрунтового каналу. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Вип. 12(2). URL: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/316>
15. Pylypaka, S., Klendii, M., & Kresan, T. (2022). Study of the movement of soil particles on the surface of a screw tillage working body. *Machinery & Energetics*, 13(2), 62-72. URL: [https://doi.org/10.31548/machenergy.13\(2\).2022.62-72](https://doi.org/10.31548/machenergy.13(2).2022.62-72)
16. Kresan, T. (2021). Movement of soil particles on surface of developable helicoid with horizontal axis of rotation with given angle of attack. *Machinery & Energetics*, 12(2), 67-75. Режим доступу: <https://technicalscience.com.ua/uk/journals/t-12-2-2021/rukh-chastinki-gruntu-po-povyerkhni-rozgortnogo-gyelikoyida-z-gorizontальноyу-vissyу-obyertannya-i-zadanim-kutom-ataki>
17. Pylypaka, S.F., Klendii, M.B., Klendii, O.M. Particle motion on the surface of a concave soil-tilling disk. *Acta Polytechnica*, 2018. Vol. 58(3). P. 201 – 208. Режим доступу: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/4125>
18. Рекламна сторінка компанії «Технік». Режим доступу: <http://tehnik.co.ua/p/freza-rotovator-kipor.html>

References

1. Kozachenko O.V., Shkrehal, O.M., Kadenko V.M. Zabezpechennia efektyvnosti robochykh orhaniv kulyvatoriv: monohrafiia. Kharkiv, PromArt, 2021. 238 s. URL: https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/21300/1/zabezpechennya_efektyvnosti_robochykh_orhaniv_monhraf_2021.pdf

2. Karaiev O. H., Matkovskiy, O.I., Chyzhykov I.O., Rubtsov N.O. Proektuvannia poverkhon robochykh orhaniv mashyn, yaki vzaiemodiiut z hruntom. Suchasni problemy modeliuvannia. 2020. Vyp. 19. S. 70 –78. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/cpm_2020_19_11
3. Mykhailov Ye.V, Volyk B.A., Tesliuk H.V., Konovyi A.V. Obhruntuvannia konstruktyvnoi skhemy strilchastoi lapy na osnovi biolohichnoho prototypu. Pratsi Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu. Melitopol, 2019. Vyp. 19, T.3. –S. 37-46 (DOI :10.31388/2078-0877-19-3-37-45)
4. Kozachenko, O., Siedykh, K., & Volkovskiy, O. (2023). Teoretychnyi analiz sylovoi vzaiemodii diskovoho robochoho orhanu z hruntovym seredovyschem. Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu. Vyp. 13(1). URL: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/357>
5. Kobets, A., Aliiev, E., Tesliuk, H., & Aliieva, O. (2023). Simulation of the process of interaction of the working bodies of tillage machines with the soil in Simcenter STAR-CCM+. *Machinery & Energetics*, 14(1), 9-23. URL: <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2023.09>
6. Zakharov, A., Rybalko, I., Tikhonov, O., & Saichuk, O. (2023). Doslidzhennia znoshuiuchoi zdatnosti gruntiv ta yii vplyv na dovhovichnist robochykh orhaniv gruntoobrobnykh mashyn. *Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu*. Vyp. 13(1). Rezhym dostupu: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/359>
7. D. O. Buslaiev, & M. O. Vasylenko (2020). Traction resistance of cultivator paws with surface hardening during operation of tillage machines. *Machinery & Energetics*, 11(1), 177-182. Режим доступу: <https://technicalscience.com.ua/uk/journals/t-11-1-2020/tyagoviy-opir-kultivatornikh-lap-z-povyerkhnyevim-zmitsnyennyam-pri-yekspluatatsiyi-gruntoobrobnykh-mashin>
8. K. V. Borak (2020). Influence of degree of abrasive particle clinging to wear mechanism of soil-cultivating machines operational mechanisms. *Machinery & Energetics*, 11(2), 35-40. URL: <https://technicalscience.com.ua/uk/journals/t-11-2-2020/vpliv-stupyenya-zakriplyennya-abrazivnoyi-chastinki-na-myekhanizm-znoshuvannya-robochikh-organiv-gruntoobrobnykh-mashin>
9. K. V. Borak (2019). Frictional interaction between soil and surface of tilling machine movable operating parts. *Machinery & Energetics*, 10(4), 157-162. Режим доступу: <https://technicalscience.com.ua/uk/journals/t-10-4->

2019/friktsiyina-vzayemodiya-gruntu-z-povyerkhnyeyu-robochikh-organiv-gruntoobrobnykh-mashin

10. Yu. B. Paladiychuk, & Ju. M. Melnik (2021). Restoration resource of working bodies of soil treatment machines by applying wear-resistant coatings. *Machinery & Energetics*, 12(4), 43-52. Режим доступу <https://technicalscience.com.ua/en/journals/t-12-4-2021/vidnovlyennya-ryesursu-robochikh-organiv-gruntoobrobnykh-mashin-nanyesyennyam-znosostiykikh-pokrit>

11. К. В. Борак . Забезпечення рівностікості зношування робочих органів ґрунтообробних машин. *НаукПраці ВНТУ*. Вип. 1, Бер 2022. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/650>

12. L. P. Sereda, & D. A. Kovalchuk (2021). Mathematical modeling soil tilling unit in the system "Soil-aggregate-energy means" for strip-till technology soil treatment. *Machinery & Energetics*, 12(4), 103-108. Режим доступу: <https://technicalscience.com.ua/uk/journals/t-12-4-2021/matyematchnyemodyelyuvannya-gruntoobrobnyago-agryegatu-v-sistyemi-grunt-agryegatyenyergyetichniy-zasib-dlya-strip-till-tyekhnologiyi-obrobitku-grunt>

13. I. M. Sivak, Yu. V. Chovnyuk, & Yu. O. Gumenyuk (2019). Substantiation of basic principles of creation of high-efficiency soilprocessing technology for agricultural appointment. *Machinery & Energetics*, 10(1), 171-175. URL: <https://technicalscience.com.ua/uk/journals/t-10-1-2019/obgruntuvannya-osnovnykh-printsipiv-stvoryennya-visokoproduktivnoyi-gruntoobrobnoyi-tyekhniki-silskogospodarskogo-priznachyennya>

14. Chyzhykov, I. (2023). Doslidzhennia protsesu stvorennia smuhovoi hriady robochym orhanom hlybokorozpushuvacha v umovakh hruntovoho kanalu. *Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu*. Vyp. 12(2). URL: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/31615>.

15. Pylypaka, S., Klendii, M., & Kresan, T. (2022). Study of the movement of soil particles on the surface of a screw tillage working body. *Machinery & Energetics*, 13(2), 62-72. URL: [https://doi.org/10.31548/machenergy.13\(2\).2022.62-72](https://doi.org/10.31548/machenergy.13(2).2022.62-72)

16. Kresan, T. (2021). Movement of soil particles on surface of developable helicoid with horizontal axis of rotation with given angle of attack. *Machinery & Energetics*, 12(2), 67-75. URL: <https://technicalscience.com.ua/uk/journals/t-12->

2-2021/rukhn-chastinki-gruntu-po-povyerkhni-rozgortnogo-gyelikoyida-z-gorizontalnouy-vissyu-obyertannya-i-zadanim-kutom-ataki

17. Pylypaka, S.F., Klendii, M.B., Klendii, O.M. Particle motion on the surface of a concave soil-tilling disk. *Acta Polytechnica*, 2018. Vol. 58(3). P. 201 – 208.

Режим доступу: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/4125>

18. Reklamna storinka kompanii «Tekhnik». Rezhym dostupu: <http://tehnik.co.ua/p/freza-rotovator-kipor.html>

PhD, assistant professor **Andrii Nesvidomin**¹,
a.nesvidomin@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1495-1718

PhD, assistant professor **Taras Pylypaka**²,
t.s.pylypaka@nuwm.edu.ua, [https:// ORCID 0009-0000-5582-1859](https://orcid.org/0009-0000-5582-1859)

PhD, assistant professor **Victor Nesvidomin**¹,
vnesvidomin@nubip.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1495-1718

PhD, assistant professor **Vitaly Babka**¹.
babkavitaliy@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4971-4285

Ph.D., assoc. prof. **Iryna Hryshchenko**¹,
irgr@yahoo.com, ORCID: 0000-0002-1000-9805

¹National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

²National University of Water Management and Nature Management

AGRICULTURAL TOOLS FOR SURFACE SOIL CULTIVATION

The object of the study is the process of finding a rational form of the tillage working organ of the drum type for reducing resistance when it is deepened into the soil. The working bodies of agricultural implements have different shapes: spring teeth, knives, cutters, chisels, paws, disks. They all interact with the soil environment, and can be active or passive. However, both in the first and in the second case, the resistance to their movement should be minimal. The article considers the shape of a curved tooth, which is fixedly fixed between two cylindrical discs that form a section. Several sections fixed on the shaft can form a drum. Such a tool can work like a side roller or a needle harrow, when they roll, the curved tooth is forcibly immersed in the soil with its subsequent loosening. It is proposed such a curvilinear shape of the tooth, which would work like a shovel: at the first stage of immersion in the soil, it glided as

much as possible along it and deformed it minimally, and at the second stage it weighed it and turned it over. Such a process of deformation of the soil should reduce the resistance to its cultivation at the first stage, which determines the relevance of the research. The purpose of the work is to establish an analytical description of the shape of a curved tooth or blade, which, when immersed in soil, would slide as much as possible along themselves, thereby reducing the resistance to immersion. To do this, the work of the tooth of a rectilinear shape was analyzed, followed by its transformation into a curvilinear one according to the task. This curve of the tooth profile turned out to be the involute of the circle, which is known for its other technical application, such as the profile of the tooth in cylindrical gears. The trajectory of the point of attachment of the tooth to the discs is a cycloid, and its end is an elongated cycloid. Part of loop of elongated cycloid in soil medium forms area of treated soil. For any tooth shape, including straight, its end describes an elongated cycloid, but for a tooth in the form of an involute circle there is a feature. It consists in the fact that at the moment of contact of the tooth with the field surface, the vector of absolute speed is directed perpendicular to it. As the discs roll, the tooth sinks into the soil, and the point of entry into it remains unchanged, and the tooth itself slides almost along itself, especially in the upper layers of the soil. After diving to the maximum depth, he begins to weigh the soil on the surface or loosen it. The article establishes analytical dependencies, provides graphic illustrations on a scale that gives an idea of the work of the working body and the profile of the treated soil. This result makes it possible to make the necessary calculations, which gives the work practical value.

Keywords: immersion in soil, tooth shape, least resistance, sliding, involuntary circle.