УДК 63.31 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.155-167

М. С. Храмов, В. А. Грубань, доц., канд. техн. наук
Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв, Україна
e-mail: khramovms@mnau.edu.ua

Обґрунтування параметрів плоских напрямних дисків комбінованої ґрунтообробної установки на основі математичного моделювання

Метою роботи є теоретичне обґрунтування параметрів плоских напрямних дисків комбінованої ґрунтообробної установки шляхом математичного моделювання взаємодії ґрунту з їхньою поверхнею.

Визначені раціональні значення радіуса направляючих дисків, що складають 0,172м та залежності площі зони диску, у якого сили тертя сприяють його обертанню, від кута піднімання ґрунту лемішем 20…25°, кінематичного параметра диску та його радіуса. Встановлено, що оптимальна відстань між направляючими дисками становить 0,12 м і більше, що унеможливлює заклинювання ґрунту між дисками під час його піднімання лемішем. Встановлення дисків під кутом один до одного збільшує тяговий опір та величину згруджування ґрунту.

ґрунтообробна установка, леміш, напрямні диски, згруджування, тертя, кінематичний параметр

Постановка проблеми. Проблема зниження негативного впливу механізованого обробітку ґрунту та витрат енергії на його проведення виникли в першій половині минулого сторіччя та є актуальними в міру збільшення інтенсифікації виробництва і маси сільськогосподарської техніки. Сучасні світові тенденції на отримання екологічно чистої продукції вимагають часткової відмови від хімічних засобів боротьби з бур'янами. Робочі органи ґрунтообробних машин не забезпечують раціонального впливу на ґрунт з точки зору агрономічної науки і еколого-економічних вимог. Тому для вдосконалення процесів обробітку ґрунту необхідний комплексний підхід до питань зменшення руйнування робочими органами машин і знарядь структури ґрунту і розробки технологічних процесів, що забезпечують оптимізацію агрофізичних властивостей ґрунту і вдосконалення технологій вирощування сільськогосподарських культур з метою зниження витрат енергії на одиницю отриманої продукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день одним із пріоритетних напрямів розвитку сільськогосподарського машинобудування є удосконалення робочих органів ґрунтообробних машин та знарядь на основі математичного моделювання процесів взаємодії робочих органів з ґрунтовим середовищем. Особливу увагу приділяють застосуванню методу дискретних елементів (Discrete Element Method, DEM), що дозволяє досліджувати процес руйнування ґрунту, переміщення його частинок, визначати силові навантаження на робочі органи та прогнозувати якість виконання технологічного процесу зменшуючи кількість експериментальних досліджень [1, 2].

© М. С. Храмов, В. А. Грубань, 2026

У роботах [3-8] показано, що DEM-моделювання є одним із найбільш ефективних інструментів аналізу взаємодії ґрунту з робочими органами сільськогосподарських машин. В цих дослідженнях наведено узагальнені сучасні контактні моделі, методики калібрування параметрів ґрунту та підходи до визначення силових характеристик і параметрів руйнування ґрунтового середовища. Авторами зазначено, що точність чисельного моделювання значною мірою визначається правильним вибором контактної моделі та параметрів калібрування та дозволяє отримувати результати, які є близькими до експериментальних.

Також, велика кількість сучасних досліджень присвячена моделюванню взаємодії ґрунту з дисковими робочими органами [9-12]. Зокрема, у роботі [2,3] розроблено DEM–MBD модель взаємодії дискового плуга з ґрунтом, що дозволяє визначати швидкість обертання диска, траєкторії переміщення частинок ґрунту та дозволяє оцінити якість обороту скиби. Зазначено, що використання поєднання DEM із багатотіловою динамікою забезпечує високу точність прогнозування технологічного процесу та може бути використане для оптимізації конструктивних параметрів пасивних дискових робочих органів. Достатньо активно розвиваються дослідження, що присвячені визначенню впливу геометричних параметрів дисків, їх кутів встановлення, швидкості руху та глибини обробітку на показники взаємодії з ґрунтом [13, 14]. Отримані результати свідчать, що зміна конструктивних параметрів дискових робочих органів істотно впливає на величину тягового опору, характер деформації ґрунту, ширину зони розпушення та інтенсивність його переміщення. Використання чисельного моделювання дозволяє визначати раціональні конструктивні параметри ще на етапі проєктування машин, що значно скорочує витрати на експериментальні дослідження.

Окремий напрям сучасних досліджень пов’язаний з аналізом зон деформації, механізмом руйнування та переміщенням ґрунту під дією різних типів робочих органів. У сучасних оглядових роботах зазначено, що при оцінюванні якісних показників ефективності роботи ґрунтообробних машин доцільно враховувати не лише тяговий опір, а показники розпушення, перемішування, бокового переміщення ґрунту та особливості формування зон деформації [15]. Саме показники цих параметрів визначають агротехнічну ефективність сучасних комбінованих ґрунтообробних машин.

Незважаючи на значну кількість досліджень, більшість із них присвячена традиційним дисковим плугам, роторним фрезам, лаповим культиваторам або сошникам [11-12]. Питання взаємодії ґрунту з плоскими напрямними дисками комбінованих ґрунтообробних установок, визначення зон дії сил тертя на їх поверхні, впливу конструктивних параметрів дисків на умови переміщення ґрунту по лемішу та запобігання його заклинюванню залишаються недостатньо висвітленими [16]. Відсутні також математичні моделі, які могли б комплексно враховували кінематику руху ґрунту відносно напрямних дисків та дозволяли обґрунтувати їх раціональні геометричні параметри.

Отже, аналіз сучасних наукових досліджень свідчить, що застосування математичного моделювання та методу дискретних елементів є ефективним інструментом дослідження процесів взаємодії ґрунту з робочими органами [17]. Разом із тим недостатньо дослідженими залишаються закономірності взаємодії ґрунту саме з плоскими напрямними дисками комбінованих ґрунтообробних установок. Це зумовлює необхідність розробки математичної моделі, яка дозволить обґрунтувати конструктивно-кінематичні параметри та підвищити ефективність функціонування установки.

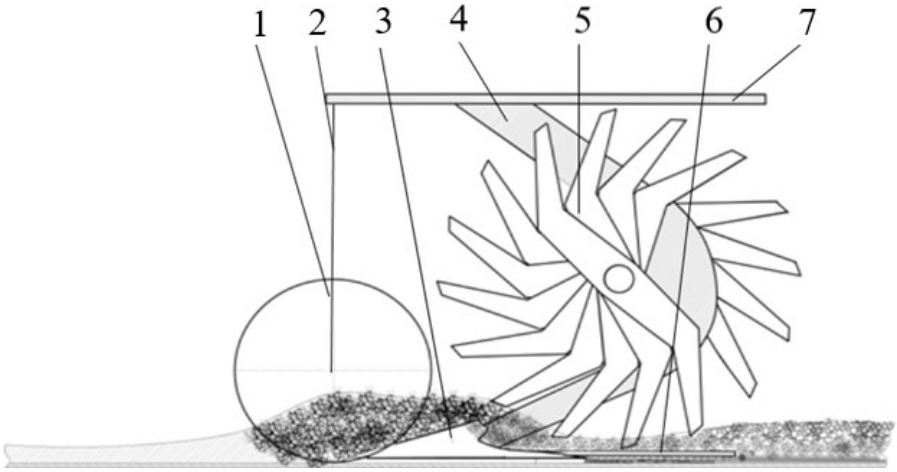
Постановка завдання. Метою роботи є теоретичне обґрунтування параметрів плоских напрямних дисків комбінованої ґрунтообробної установки шляхом математичного моделювання взаємодії ґрунту з їхньою поверхнею.

Виклад основного матеріалу. Робочі органи для підрізання та підіймання ґрунту експериментальною ґрунтообробною установкою, не забезпечують належним чином рух ґрунту за підрізаючою лапою при глибини обробітку від 3 до 12 см. У зв'язку з цим виникла потреба у визначенні робочих органів для їх застосування у різних технологіях механізованого обробітку ґрунту [18].

З метою того, щоб ґрунт не згруджувався і не розсипався в сторони, з обох боків леміша необхідно встановити диски, що вільно обертаються [19].

Плоскі диски використовують як основні та додаткові робочі органи. Розглянуто застосування плоских дисків, що вільно обертаються як додаткових робочих органів (рис. 1).

Встановлені на рамі 7 через кронштейн 2 плоскі диски, що вільно обертаються 1 при русі заглиблюються в ґрунт і перекочуються в ньому. За умов переміщення своєї осі в напрямку обертання ротора 5, диски 1, сприяють відриву ґрунту від масиву, що підтиснений між ними, і далі рухають його по лемішу. Стрілчаста лапа (леміш) 3 встановлена на стійці 5, що кріпиться до рами 7, забезпечує їх заглиблення, піднімання шару ґрунту відірваного від масиву плоскими дисками 1, що вільно обертаються, які за умов підіймання, частково кришаться, утворюючи ґрунтове ядро перед лемішем, 3. Також напрямні диски 1 обмежують згруджування ґрунту з леміша на сторони.



1 – напрямний плоский диск; 2 – кронштейн; 3 – леміш; 4 – стійка; 5 – роторний робочий орган; 6 – сепаруюча решітка; 7 – рама

Рисунок 1 – Принципова схема експериментальної установки:

Джерело: розроблено авторами

Ножі ротора 5 захоплюють ґрунт, кришать і переміщують його по решітці. Дрібні грудочки проходять через отвори сепаруючої решітки, за таких умов при цьому на поверхню ґрунту викидаються великі грудки, пожнивні рештки, і рослини з корінням, у тому числі і кореневища бур'янів. В результаті відбувається сепарація оброблюваного шару ґрунту, розшарування його по структурному складу, знищення бур'янів завдяки їх механічному вичісуванню з оброблюваного шару ґрунту, без пошкодження кореневої системи, а на поверхні з пожнивних залишків утворюється мульчуючий шар.

При русі експериментальної ґрунтообробної установки плоскі диски, що вільно обертаються, заглиблюються в ґрунт і перекочуються в ньому. За умов переміщення

своєї осі в напрямку обертання ротора. Обертальним рухом дисків, ґрунт, який затиснутий між ними, відривається від масиву та далі рухається за лемішем.

При русі секції експериментальної ґрунтообробної установки ґрунт на леміші між дисками накопичується доти, поки підпір не буде достатнім для його відносного руху. На відносний рух ґрунту по лемішу впливає напрямок і величина сил тертя, що виникають між дисками, що вільно обертаються і ґрунтом. Для визначення напрямку сил тертя розглянемо кінематику руху частинок ґрунту по відношенню до внутрішньої поверхні дисків, що обертаються.

Припустимо, що секція комбінованої установки переміщується рівномірно та прямолінійно, а внутрішня поверхня плоских дисків взаємодіє з частинками ґрунту, які піднімаються під впливом леміша, та не суміщує їх.

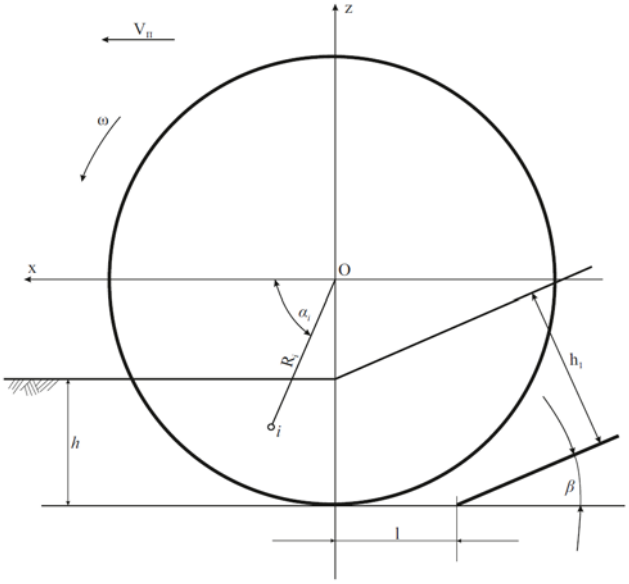


Рисунок 2 – Схема до визначення рівняння траєкторії руху частинки ґрунту відносно поверхні диску

Джерело: розроблено авторами

Тоді проектуючи радіус-вектор R_i та i частинки ґрунту на вісі рухомих координат XOZ (рис. 2) враховуючи обертання напрямних дисків отримаємо систему рівнянь траєкторії її руху:

$$\left\{\begin{array}{l} X = \left(R_i \cos\alpha_i - V_П t\right)\cos\omega t + \left(R_i \sin\alpha_i + KV_П t\right)\sin\omega t \\ Z = \left(R_i \cos\alpha_i - V_П t\right)\sin\omega t - \left(R_i \sin\alpha_i + KV_П t\right)\cos\omega t \end{array}\right\}, \quad (1)$$

де $\alpha_i = \arcsin\dfrac{R - h_i}{R_i}$ – це кут, який характеризує заглиблення диска радіусом R на глибину h_i у ґрунт; R– радіус дисків; $K = tg\beta$ – кутовий коефіцієнт; β – кут підйому ґрунту лемішем; $V_П$ – поступальна швидкість руху експериментальної установки; t – час руху; ωt – кут повороту дисків.

Напрямок дії сили тертя частинки ґрунту по диску збігається з вектором його відносної швидкості, яка спрямована по дотичній до траєкторії руху і визначається за допомогою рівняння:

$$\frac{z_k - z}{\dot{z}} = \frac{x_k - x}{\dot{x}},$$

або

$$A_1 x_k - B_1 z_k - C_1 = 0, \tag{2}$$

де x_k, z_k – поточні координати дотичної лінії.

Враховуючи рівняння (1) та (рис. 2) отримаємо:

$$\begin{aligned} A_1 &= \left[KV_П - \left(R_i \cos\alpha_i - V_П t\right)\omega\right]\sin\omega t + \left[V_П - \left(R_i \sin\alpha_i + KV_П t\right)\right]\cos\omega t, \\ B_1 &= \left[\left(R_i \sin\alpha_i + KV_П t\right)\omega - V_П\right]\cos\omega t + \left[\left(R_i \cos\alpha_i - V_П t\right)\omega - KV_П\right]\sin\omega t, \\ C_1 &= \omega\left(R_i \cos\alpha_i - V_П t\right)^2 + \omega\left(R_i \sin\alpha_i + KV_П t\right)^2 - V_П R_i\left(\sin\alpha_i + k\cos\alpha_i\right). \end{aligned} \tag{3}$$

Полярну відстань від прямої, що описується рівнянням (2), до вісі обертання диска знайдемо за формулою:

$$l_П = \frac{\omega\left(R_i \cos\alpha_i - V_П t\right)^2 + \omega\left(R_i \sin\alpha_i + KV_П t\right)^2 - V_П R_i\left(\sin\alpha_i + K\cos\alpha_i\right)}{\sqrt{\left[\left(R_i \sin\alpha_i + KV_П t\right)\omega - V_П\right]^2 + \left[\left(R_i \cos\alpha_i - V_П t\right)\omega - KV_П\right]^2}}, \tag{4}$$

При цьому бічні поверхні дисків мають зони, в яких сили тертя сприяють обертанню дисків або гальмують їх. На межі поділу зони $l_П = 0$. Тоді,

$$\omega\left(R_i \cos\alpha_i - V_П t\right)^2 + \omega\left(R_i \sin\alpha_i + KV_П t\right)^2 - V_П R_i\left(\sin\alpha_i + K\cos\alpha_i\right) = 0. \tag{5}$$

Якщо відлік часу починати з розташування частки ґрунту щодо диска, у якому $l_П = 0$, тобто $t = 0$, та розв'язати рівняння (5) відносно R_i, то після певних перетворень отримаємо рівняння лінії, яка розділяє зони тертя на бічні поверхні диска:

$$R_i = \frac{R}{\lambda}\left(\sin\alpha_i + K\cos\alpha_i\right). \tag{6}$$

де $\lambda = \dfrac{\omega R}{V_П}$ – кінематичний параметр обертання дисків.

За відсутності підйому ґрунту рівняння межі, що розділяє зони на дисках, має вигляд:

$$R_i = \frac{R}{\lambda}\sin\alpha_i. \tag{7}$$

За рівняннями (6) та (7) побудовано лінію границі (рис. 3), що розділяє зони тертя на бічній поверхні диска.

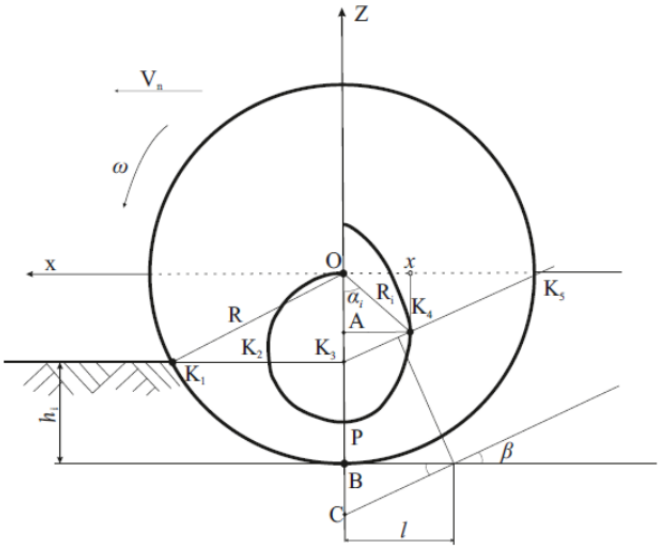


Рисунок 3 – Схема зон тертя ґрунту на бічній поверхні плоского диска

Джерело: розроблено авторами

В середині зони $K_2PK_4K_3$ на диск діють сили тертя, які сприяють обертанню диска, а в зоні $K_1BK_5K_4PK_2$ ці сили гальмують його обертання. Отже, в зоні K_3PK_4 напрямок дії сил тертя проходитиме нижче центру обертання дисків, а в зоні PBK_5K_4 – вище за нього. Тому, якщо елементарна ділянка диска буде знаходитись в зоні K_3PK_4, то проекція сили тертя на нормаль до леміша, що знижує питомий тиск ґрунту на нього, буде меншою, ніж проекція сили при розташуванні цієї ділянки в зоні . Проекція сили тертя на напрямок відносного руху ґрунту по лемішу при розміщенні елементарної ділянки диска в зоні K_3PK_4 буде більшою, ніж у зоні PBK_5K_4. Тому розташування над лемішем зони гальмування буде знижуватися згруджування ґрунту і тим самим підвищать надійність подачі його до підйомно-сепаруючого пристрою. Отже, для зниження згруджування на леміші площа зони K_3PK_4, де сили тертя сприяють обертанню дисків, мають бути мінімальними. Для розрахунку площі зони K_3PK_4 знайдено відстань від центру обертання диска до *i*-ї елементарної ділянки R_i і кут між віссю координат і радіусом-вектором α_i, які визначають положення точки перетину межі зон і прямої K_4K_5, що проходить по поверхні ґрунту над лемішем.

Рівняння прямої K_4K_5:

$$K_4K_5^2 = XK_5^2 + XK_4^2, \tag{7}$$

Визначили:

$$R = OK_5, \tag{8}$$

$$XK_y = OA = R_i \cos\alpha_i, \tag{9}$$

$$AK_4 = OX = R_i \sin\alpha_i \ . \tag{10}$$

Знаходимо визначення K_5X:

$$K_5X = R - R_i \sin\alpha, \tag{11}$$

Підставивши (11), (9) у (7) отримаємо:

$$K_4K_5^2 = \left[R - R_i\cos\alpha\right]^2 + \left[R_i\cos\alpha\right]^2, \tag{12}$$

Значення довжини K_4K_5 від кута α_i:

$$K_4K_5 = \sqrt{\left(R - R_i\sin\alpha_i\right)^2 + \left(R_i\cos\alpha_i\right)^2}, \tag{13}$$

де R_i – відстань від центру обертання диска до *i*-ї елементарної ділянки.

Враховуючи розпушеність в полярному вигляді запишемо:

$$R_i = \frac{R - lK - \dfrac{h_1}{\cos\beta}}{\sin\alpha_i + K\cos\alpha_i}, \tag{14}$$

де l – відстань від вертикальної вісі дисків до носка леміша;

h_1 – товщина шару ґрунту на леміші з урахуванням розпушеності в полярному вигляді.

Розв'язавши систему рівнянь (6) і (8), знаходимо значення кута α_i:

$$\alpha_i = \arccos\frac{1}{1+K^2}\left[K\sqrt{\frac{\lambda\left(R - lK - h_1/\cos\beta\right)}{R}} - \right.$$

$$\left. - \sqrt{\frac{R\left(1+K^2\right) - \lambda\left(R - lK - h_1/\cos\beta\right)}{R}}\right]. \tag{15}$$

Знайдемо рівняння визначення площі $S_{K_3PK_4}$

$$S_{K_3PK_4} = \frac{R^2}{2\lambda^2}\left[\frac{a\left(1+K^2\right)}{2}\arccos a - \frac{\sqrt{1-a^2}\left[a\left(1-K^2\right)\right.}{2} - \right.$$

$$\left. - \frac{2K\sqrt{1-a^2}\right]}{} - \frac{\pi^2\left(1+K^2\right)}{4} - K\left.\right] + \frac{a\left(R - Kl - h_1/\cos\beta\right)^2}{2\sqrt{1-a^2} + Ka}, \tag{16}$$

де

$$a = \frac{1}{1+K^2}\left[K\sqrt{\frac{\lambda\left(R - Kl - h_1/\cos\beta\right)}{R}} - \sqrt{\frac{R\left(1+K^2\right) - \lambda\left(R - Kl - h_1/\cos\beta\right)}{R}}\right].$$

При цьому необхідно враховувати, що при значенні величини кінематичного параметра λ менше одиниці межі зон, що описується рівнянням (6), виходить за межі диска, та його площа, яка визначається виразом (10), зменшується. Площа зони на диску складе:

$$S_H = \int_{R_{i1}}^{R_{i2}}\int_{\alpha_{i_1}}^{\alpha_{i_3}} R_i d_{R_i} d_{\alpha_i}\cdot, \tag{17}$$

Інтегруючи рівняння по α_i, знайдемо шукану площу зони поза дисками

$$S_H = \frac{R^2}{2\lambda}\left[\frac{1+K^2}{2}\arccos b - \frac{\sqrt{1-b^2}\left(1-K^2\right)b}{2} + \right.$$

$$\left. + K\left(1-b^2\right) - \frac{\pi\left(1+K^2\right)}{4} - K\right] - \frac{R^2}{2}\arccos b + \frac{\pi R^2}{4},$$

(18)

де $b = \frac{1}{1+K^2}\left(\lambda K - \sqrt{\left(1+K^2\right)-\lambda^2}\right)$.

На рис. 4 наведено залежності площі зони диску, у якого сили тертя сприяють його обертанню, від кута піднімання ґрунту лемішем α_i, кінематичного параметра диску та його радіусу.

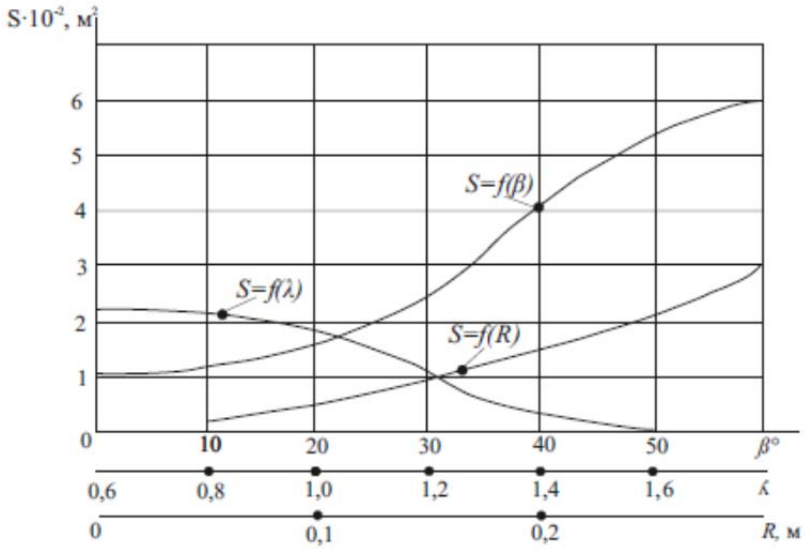


Рисунок 4 – Залежності площі зони дисків, в яких сили тертя сприяють їхньому обертанню, від кута підйому ґрунту лемішем, кінематичного параметра дисків та їх радіусу

Джерело: розроблено авторами

Аналізуючи рис. 4 визначимо, що зі збільшенням кута підйому, радіуса плоских дисків і зменшенням їх кінематичного параметра площа зони, в якій сили тертя сприяють обертанню дисків, збільшується. Причому зі збільшенням кута підйому на 1° в межах 0-25° площа зони K_3PK_4 зростає в середньому на 3,3%, а при 25-50° – на 10,4%.

Зниження кінематичного параметра від 1,4 до 1,0 призводить до збільшення площі у 4,5 рази, а від 1 до 0,6 – у 1,2 рази. Отже, сили тертя плоских дисків покращуватимуть умови щодо відносного руху ґрунту по лемішу зі зменшенням кута нахилу та радіусу напрямних дисків та зі збільшенням кінематичного параметра λ.

Особливо незадовільні умови для руху ґрунту створюються за кута постановки леміша більше 20-25° і кінематичного параметра менше одиниці.

Мінімальна величина радіуса направляючих дисків обумовлюється технологічною надійністю роботи комбінованої установки. За таких умов, рівень

ґрунту, що переміщається за лемішем, повинен бути нижчим за вал дисків. З цієї умови:

$$R \geq \left(h_1 + h_2 + r_в\right)\cos\beta, \tag{19}$$

де h_2 – допустима величина зазору між валом диску та ґрунтом; β – кут підйому ґрунту лемішем; $r_в$ – радіус валу диску.

Товщину ґрунту на леміші враховуючи вспушеність h_1 визначали за формулою:

$$h_1 = h\frac{\sin\left(\beta+\psi\right)}{\sin\psi}. \tag{20}$$

де ψ – кут сколювання пласта ґрунту; h – глибина ходу дисків.

Відповідно до рис.3 та формул (13), (14) величина мінімального радіуса дисків становить 0,172 м при h=0,12 м, h_2=0,01 м, α=25°, ψ=45°, $r_в$=0,02 м, β=25°.

Граничну відстань між дисками, за якої відбувається заклинювання ґрунту, визначали за абсолютної вологості ґрунту 7,1%, 15,9%, 19,4% та 28,3%, глибині ходу дисків 0,03 м, 0,06 м, 0,09 м та 0,12 м, швидкості руху візка ґрунтового каналу – 1 м/с [20]. Кут заточування дисків дорівнював 20°, а їх товщина – 0,003 м. Результати експериментальних даних наведено на рис. 5.

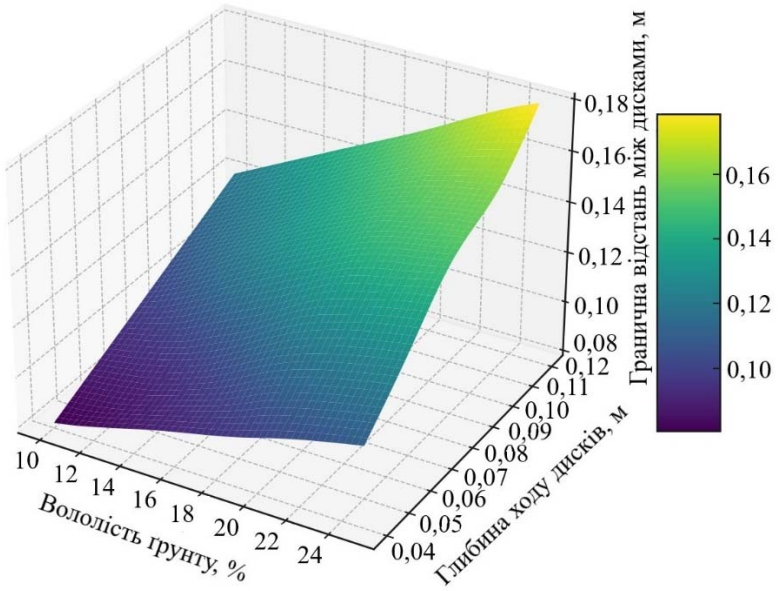


Рисунок – 5 Залежність граничної відстані між дисками від вологості ґрунту та глибини їх ходу
Джерело: розроблено авторами

Побудовано 3D-графік поверхні відгуку визначає залежність показників граничної відстані між дисками, що залежить від вологості ґрунту та глибини їх ходу. Вісь *X* візуалізує вологість ґрунту (7,1%-28,3%), вісь *Y* – глибину ходу дисків (0,03 м-0,12 м), вісь *Z* – відстань між дисками в метрах.

Аналізуючи рисунок можна зробити висновок, що при збільшенні вологості та глибини ходу дисків показник граничної відстані між ними підвищується. Ґрунт з більшою вологістю та пластичністю вимагає більшої відстані між дисками, з метою унеможливлення заклинювання. Більш глибокий хід дисків також збільшує цю відстань, оскільки потребує більшого простору для ефективної взаємодії з ґрунтом. Максимальні показники граничної відстані отримуються за значень найбільшої вологості ґрунту та глибині ходу дисків.

Встановлено, що показник максимальної відстані між дисками змінюється в залежності від стану вологості ґрунту (від 7,1% до 28,3%) та глибини ходу дисків (0,03 м, 0,06 м, 0,09 м, 0,12 м). При підвищенні вологості ґрунту та глибини ходу дисків гранична відстань між ними збільшувався. Ґрунт, який має більшу вологість потребує збільшення відстані між дисками для ефективного піднімання та переміщення масиву. При збільшенні глибини ходу зазначена відстань також буде збільшуватись. Наприклад, за глибини 0,12 м і максимальної вологості гранична відстань досягала 0,23 м, тоді як за 0,03 м – 0,172 м. При проведенні досліджень було встановлено, що збільшення глибини ходу дисків призводить до підвищення цієї відстані на 53-60% в залежності від рівня вологості.

При проведенні польових випробувань при посіві овочевих культур показник вологості ґрунту знаходився в межах 22...24%. При глибини ходу дисків 0,06...0,09 м, гранична відстань між ними повинна складати 0,068...0,090 м. У зв'язку з цим для забезпечення гарантованого заклинювання ґрунту відстань між дисками повинна дорівнювати або бути меншою 0,09 м. Для підйому ґрунту лемішем без заклинювання відстань між дисками повинна складати – 0,12 м.

Висновки. Визначені раціональні значення радіуса направляючих дисків 0,172м та залежності площі зони диску, у якого сили тертя сприяють його обертанню, від кута піднімання ґрунту лемішем 20…25°, кінематичного параметра диску та його радіуса. Експериментально встановлено, що оптимальна відстань між направляючими дисками повинна складати 0,12 м і більше, як наслідок, це призводить до унеможливлення заклинювання ґрунту між дисками при його підніманні лемішем. Встановлення дисків під кутом один до одного збільшує тяговий опір та величину згруджування ґрунту.

Список літератури

1. Zhao H., Huang Y., Liu Z., Liu W., Zheng Z. Applications of Discrete Element Method in the Research of Agricultural Machinery: A Review. *Agriculture*. 2021. Vol. 11(5). Article 425. https://doi.org/10.3390/agriculture11050425.
2. Ucgul M. Simulating Soil–Disc Plough Interaction Using Discrete Element Method–Multi-Body Dynamic Coupling. *Agriculture*. 2023. Vol. 13(2). Article 305. https://doi.org/10.3390/agriculture13020305
3. Ucgul M., Saunders C., Fielke J. et al. Review of Discrete Element Method Simulations of Soil Tillage and Furrow Opening. *Agriculture*. 2023. Vol. 13(3). Article 541. https://doi.org/10.3390/agriculture13030541
4. Barrozo Chaves J.V., Rosas K.L., Filho A.P. Soil conservation and information technologies: A literature review. *Smart Agricultural Technology*. 2025. Vol. 11, 100935. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100935
5. Wang X., Fang W., Han D., Chen X. Review of the Research on Soil Disturbance by Tools. *Appl. Sci.*, 2023. *13*(1), 338. https://doi.org/10.3390/app13010338
6. Hoseinian S., Hemmat A., Esehagh Beygi A. Development of a Dual Sideway-Share Subsurface Tillage Implement: Part 1. Modeling Tool Interaction with Soil Using DEM. *Soil and Tillage Research*. 2021. Vol. 215. Article 105201. DOI:10.1016/j.still.2021.105201
7. Hoseinian S., Hemmat A., Esehagh Beygi A. Development of a Dual Sideway-Share Subsurface Tillage Implement: Part 2. Effect of Tool Geometry on Tillage Forces and Soil Disturbance Characteristics. *Soil and Tillage Research*. 2022. Vol. 215. Article 105200. DOI:10.1016/j.still.2021.105200
8. Kim Y. S., Siddique Md. A., Kim W.S., Kim Y.J. DEM Simulation for Draft Force Prediction of Moldboard Plow According to the Tillage Depth in Cohesive Soil. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 189. Article 106368. DOI:10.1016/j.compag.2021.106368
9. Zeng Z., Chen Y., Ma X. Comparison of Soil and Corn Residue Cutting Performance of Different Discs Used for Vertical Tillage. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Article 2537. DOI:10.1038/s41598-021-82270-9
10. Makange N., Ji C., Nyalala I. et al. Prediction of Precise Subsoiling Based on Analytical Method, Discrete Element Simulation and Experimental Data from Soil Bin. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Article 11082. DOI:10.1038/s41598-021-90682-w

11. Wu P., Chen Y. Discrete Element Modelling of the Effect of Disc Angle and Tilt Angle on Residue Incorporation Resulting from a Concave Disc Computers and Electronics in *Agriculture*. 2024. Vol. 224. Article 109222. DOI:10.1016/j.compag.2024.109222
12. Zhang S., Jia X., Wang X. Optimization of Operating Angles of Disc Coulters for Maize Residue Management Using Discrete Element Method *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 218. Article 108691. DOI: 10.1016/j.compag.2024.108691
13. Patidar P., Soni P., Jain A. Modelling Soil–Rotor Blade Interaction of Vertical Axis Rotary Tiller Using Discrete Element Method (DEM) *Journal of Terramechanics*. 2024. Vol. 112. P. 59-68. DOI:10.1016/j.jterra.2024.01.001
14. Wang X., Du R., Geng L. et al. Performance Evaluation of a Cicada-Inspired Subsoiling Tool Using DEM Simulations. *Biomimetics*. 2024. Vol. 9(1). Article 25. https://doi.org/10.3390/biomimetics9010025
15. Vetokhin V., Popov S., Ryzhkova T., Negrebetskyi I., Leshchenko S., Amosov V., Machok Y., Petrenko D. Improving the soil bin for studying rotary tools taking into account the kinematic features of interaction with the soil. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologie*s. 2024. 6 (132), 31–40. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.315127
16. Грубань В., Храмов М. Дослідження процесу підрізання та підйому ґрунту робочими органами ґрунтообробної установки. *Інновації в агроінженерії : матеріали міжнародної науково-практичної конференції (м. Миколаїв, 7-9 квітня 2026 р.)*. Миколаїв : МНАУ, 2026. С. 98-102.
17. Pasternak, V., Ruban, A., Popovych, V., & Khramov, M. Application of Information Technologies in Modeling Multi-Component Systems with Particles of Various Geometry. Materials Science Forum, 2025. 1172, 101–111. https://doi.org/10.4028/p-5qgydS
18. Сиромятников Ю.М. Храмов М.С. Процес підйому ґрунту робочими органами ґрунтообробної розрихлювально-сепаруючої установки. *Podilian Bulletin: Agriculture, Engineering, Economics.* 2020. 33, С. 86-96. https://doi.org/10.37406/2706-9052-2020-2-11
19. Грубань В., Храмов М. Дослідження процесу підрізання та підйому ґрунту робочими органами ґрунтообробної установки. Інновації в агропромисловому комплексі, машинобудуванні та транспорті : зб. тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції, 9-10 квітня 2025 року. [Електронне видання]. Рівне : НУВГП, 2025. С. 88-92.
20. Храмов М.С. Визначення відстані між напрямними дисками комбінованої ґрунтообробної установки. Збірник тез доповідей XI Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь. PTDSTSAMT 2025» з нагоди 30-річчя започаткування підготовки ОС «Бакалавр» за спеціальністю «Агроінженерія». 11 квітня 2025 року. МОН України. Житомирський агротехнічний фаховий коледж. Житомир. 2025. С. 218-220. https://doi.org/10.64165/proceeding-ptdstsamt.2025

References

1. Zhao, H., Huang, Y., Liu, Z., Liu, W., & Zheng, Z. (2021). Applications of Discrete Element Method in the Research of Agricultural Machinery: A Review. *Agriculture*, 11(5), Article 425. https://doi.org/10.3390/agriculture11050425.
2. Ucgul, M. (2023). Simulating Soil–Disc Plough Interaction Using Discrete Element Method–Multi-Body Dynamic Coupling. *Agriculture*, 13(2), Article 305.
3. Ucgu,l M., Saunders, C., Fielke, J. et al. (2023). Review of Discrete Element Method Simulations of Soil Tillage and Furrow Opening. *Agriculture*, 13(3), Article 541.
4. Barrozo Chaves, J.V., Rosas, K.L., & Filho, A.P. (2025). Soil conservation and information technologies: A literature review. *Smart Agricultural Technology*, 11, 100935. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100935
5. Wang, X., Fang, W., Han, D.,& Chen, X. (2023). Review of the Research on Soil Disturbance by Tools. *Appl. Sci.*, *13*(1), 338. https://doi.org/10.3390/app13010338
6. Hoseinian S., Hemmat A., Esehagh Beygi A. (2021). Development of a Dual Sideway-Share Subsurface Tillage Implement: Part 1. Modeling Tool Interaction with Soil Using DEM. *Soil and Tillage Research*. Vol. 215. Article 105201. DOI:10.1016/j.still.2021.105201
7. Hoseinian S., Hemmat A., Esehagh Beygi A. (2022). Development of a Dual Sideway-Share Subsurface Tillage Implement: Part 2. Effect of Tool Geometry on Tillage Forces and Soil Disturbance Characteristics. *Soil and Tillage Research*. Vol. 215. Article 105200. DOI:10.1016/j.still.2021.105200
8. Kim Y. S., Siddique Md. A., Kim W.S., Kim Y.J. (2021). DEM Simulation for Draft Force Prediction of Moldboard Plow According to the Tillage Depth in Cohesive Soil. *Computers and Electronics in Agriculture*. Vol. 189. Article 106368. DOI:10.1016/j.compag.2021.106368

9. Zeng Z., Chen Y., Ma X. (2021). Comparison of Soil and Corn Residue Cutting Performance of Different Discs Used for Vertical Tillage. *Scientific Reports*. Vol. 11. Article 2537. DOI:10.1038/s41598-021-82270-9
10. Makange N., Ji C., Nyalala I. et al. (2021). Prediction of Precise Subsoiling Based on Analytical Method, Discrete Element Simulation and Experimental Data from Soil Bin. *Scientific Reports*. Vol. 11. Article 11082. DOI:10.1038/s41598-021-90682-w
11. Wu P., Chen Y. Discrete Element Modelling of the Effect of Disc Angle and Tilt Angle on Residue Incorporation Resulting from a Concave Disc (2024). Computers and Electronics in *Agriculture*. Vol. 224. Article 109222. DOI:10.1016/j.compag.2024.109222
12. Zhang S., Jia X., Wang X. Optimization of Operating Angles of Disc Coulters for Maize Residue Management Using Discrete Element Method (2024). *Computers and Electronics in Agriculture*. Vol. 218. Article 108691. DOI: 10.1016/j.compag.2024.108691
13. Patidar P., Soni P., Jain A. Modelling Soil–Rotor Blade Interaction of Vertical Axis Rotary Tiller Using Discrete Element Method (DEM) (2024). *Journal of Terramechanics*. Vol. 112. P. 59-68. DOI:10.1016/j.jterra.2024.01.001
14. Wang X., Du R., Geng L. et al. (2024). Performance Evaluation of a Cicada-Inspired Subsoiling Tool Using DEM Simulations. *Biomimetics*. Vol. 9(1). Article 25. https://doi.org/10.3390/biomimetics9010025
15. Vetokhin, V., Popov, S., Ryzhkova, T., Negrebetskyi, I., Leshchenko, S., Amosov, V., Machok, Y., & Petrenko, D. (2024). Improving the soil bin for studying rotary tools taking into account the kinematic features of interaction with the soil. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (132), 31–40. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.315127
16. Hruban V., Khramov M. (2026). Research on the process of cutting and lifting the soil by the working bodies of the tillage installation. *Innovations in agricultural engineering: materials of the international scientific and practical conference (Mykolaiv, April 7-9, 2026)*. Mykolaiv: MNAU. 98-102. [in Ukrainian].
17. Pasternak, V., Ruban, A., Popovych, V., & Khramov, M. (2025). Application of Information Technologies in Modeling Multi-Component Systems with Particles of Various Geometry. Materials Science Forum, 1172, 101–111. https://doi.org/10.4028/p-5qgydS
18. Syromyatnikov, Yu. M., & Khramov, M. S. (2020). The process of lifting soil by the working bodies of a soil tillage loosening and separating unit. *Podolskyi visnyk: agriculture, technology, economics*, (33), 86-96. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.37406/2706-9052-2020-2-11
19. Hruban V., Khramov M. (2025). Research on the process of cutting and lifting the soil by the working bodies of the tillage machine. Innovations in the agro-industrial complex, mechanical engineering and transport: collection of abstracts of the International Scientific and Practical Conference, April 9-10, 2025. [Electronic edition]. – Rivne: NUVGP. P. 88-92.
20. Khramov M.S. (2025). Determination of the distance between the guide disks of the combined tillage machine. Collection of abstracts of the XI International Scientific and Practical Conference “Prospects and Trends in the Development of Structures and Technical Service of Agricultural Machines and Tools. PTDSTSAMT 2025” on the occasion of the 30th anniversary of the start of the training of the OS “Bachelor” in the specialty “Agroengineering”. April 11, 2025. MES of Ukraine. Zhytomyr Agrotechnical Vocational College. Zhytomyr. P. 218-220. https://doi.org/10.64165/proceeding-ptdstsamt.2025

Mykyta Khramov, Vasil Hruban, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Mykolayv National Agrarian University, Mykolayv, Ukraine

Mathematical Modeling of Soil Interaction with Flat Guide Discs of a Combined Tillage Unit

The purpose of the study is to develop a mathematical model describing the interaction of soil with flat guide discs of a combined tillage unit and to substantiate their rational design parameters. The study aims to determine the regularities of soil particle movement, identify the friction zones on the disc surface, and establish the optimal geometric parameters of the guide discs to ensure efficient soil lifting and transportation.

The study is based on theoretical methods using the principles of theoretical mechanics and mathematical modeling of soil-tool interaction. A mathematical model of soil particle motion relative to the side surface of flat guide discs was developed. Analytical dependences describing the formation of friction zones on the disc surface were obtained, taking into account the kinematic parameter, the soil lifting angle, and the disc radius. The influence of these parameters on the area of the friction zone contributing to disc rotation was investigated. Mathematical dependences were also derived to determine the minimum allowable radius of the guide discs and the limiting distance between adjacent discs depending on soil moisture content and operating

depth. Based on the developed model, response surface analysis was carried out to evaluate the combined influence of soil moisture and disc operating depth on the limiting spacing between discs. The obtained results make it possible to predict the operating conditions of the guide discs and to optimize their design parameters during the engineering design stage of combined tillage equipment.

The conducted research established that the rational radius of the flat guide discs is 0.172 m. It was found that the area of the friction zone promoting disc rotation depends on the soil lifting angle within 20-25°, as well as on the kinematic parameter and disc radius. The optimal spacing between the guide discs should be 0.12 m or more, which prevents soil clogging between the discs during soil lifting by the sweep. The developed mathematical model can be used as a theoretical basis for improving combined tillage units and increasing the efficiency of soil cultivation while reducing energy consumption.

soil tillage equipment, share, guide discs, compaction, friction, kinematic parameter

Одержано (Received) 21.06.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 24.06.2026*
Дата публікації (Publication Date) 30.06.2026 *Прийнято до друку (Approved) 26.06.2026*

УДК 631.316.4:631.361.8 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.167-177

Д. В. Богатирьов, доц., канд. техн. наук, **В. М. Сало,** проф. д-р. техн. наук,
О. В. Юрченко, доц., канд. економ. наук, **Т. В. Червоний**
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: bohatyrovdv@kntu.kr.ua

Обґрунтування просторової орієнтації стебел соняшнику для підвищення працездатності котків-подрібнювачів

У статті наведено результати експериментальних досліджень процесу забивання міжножового простору барабана котка-подрібнювача рослинних решток. Метою роботи є визначення впливу конструктивних та агротехнічних параметрів на стабільність технологічного процесу. Встановлено закономірності зміни ймовірності забивання робочого органу залежно від кута розхилу ножів та кута нахилу стебел при різних показниках вологості маси і твердості ґрунту. Доведено, що збільшення кутових параметрів механізму, зниження вологості стебел та підвищення несучої здатності ґрунту суттєво зменшують накопичення рослинної маси між ножами. За результатами експериментів розроблено оптимізовані нелінійні регресійні моделі. Отримані емпіричні рівняння дозволяють прогнозувати ймовірність забивання та раціонально обґрунтовувати параметри барабана на етапі його проєктування.

оток-подрібнювач, рослинні рештки, міжножовий простір, ймовірність забивання, кут розхилу, кут нахилу, регресійна модель, фізико-механічні властивості

Постановка проблеми. Сучасні тенденції розвитку рослинництва, зумовлені глобальними змінами клімату та дефіцитом вологи, вимагають оптимізації технологічних процесів обробітку ґрунту та сівби [1]. При застосуванні традиційних систем обробітку нерівномірно розподілені великофракційні рослинні рештки товстостебельних культур часто призводять до забивання сошників посівних машин, порушення рівномірності глибини загортання насіння та критичного зниження польової схожості [2]. Водночас перехід до новітніх ресурсоощадних технологій (No-

© Д. В. Богатирьов, В. М. Сало, О. В. Юрченко, Т. В. Червоний, 2026