
Модель аналітичного дослідження взаємодії дискового робочого органу з ґрунтом

Сергій Грушецький

Кафедра агроінженерії і системотехніки імені Михайла Самокиша, Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна
ORCID 0000-0002-0487-6152

Богдан Боднарук

Кафедра агроінженерії і системотехніки імені Михайла Самокиша, Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна
ORCID 0000-0002-0487-6152

Для цитування цієї статті:

Грушецький Сергій, Боднарук Богдан. Модель аналітичного дослідження взаємодії дискового робочого органу з ґрунтом. International Science Journal of Engineering & Agriculture. Vol. 3, No.5, 2024, pp. 30-43. doi: 10.46299/j.isjea.20240305.04.

Надійшла до редакції: 04 вересня 2024 р.; **Схвалено:** 30 вересня 2024 р.;

Опубліковано: 01 жовтня 2024 р.

Анотація: В даній роботі представлена модель аналітичного дослідження взаємодії дискового робочого органу з ґрунтом. Модель спрямована на вивчення фізичних та механічних процесів, що відбуваються під час роботи дискового органу в ґрунті. Основна мета дослідження полягає у точному прогнозуванні ефективності роботи дискових механізмів, аналізі їх впливу на структуру ґрунту та визначенні оптимальних умов для забезпечення високих агрономічних показників. У роботі розглядаються математичні моделі, що враховують різні фактори, такі як густина ґрунту, швидкість обробки та конструктивні особливості дискових органів. Результати дослідження дозволяють покращити проектування та налаштування сільськогосподарської техніки, а також сприяють підвищенню її продуктивності та зменшенню витрат ресурсів.

Ключові слова: модель, аналітичне дослідження, взаємодія, дисковий робочий орган, ґрунт.

1. Вступ

В умовах сучасного сільського господарства ефективність ґрунтообробних знарядь безпосередньо впливає на продуктивність аграрного виробництва. Одним з ключових компонентів таких знарядь є дискові робочі органи, які використовуються для розпушування, боронування та інших видів обробки ґрунту. Сучасні технології вимагають детального розуміння фізичних і механічних процесів, що відбуваються під час взаємодії дискових органів з ґрунтовим середовищем, щоб забезпечити оптимальні умови для їх функціонування.

Модель аналітичного дослідження взаємодії дискового робочого органу з ґрунтом є важливим інструментом для досягнення цієї мети. Така модель дозволяє не лише проаналізувати фізичні сили і моменти, що виникають під час роботи, але й прогнозувати їхній вплив на агрономічні та енергетичні показники процесу обробки ґрунту. Це включає оцінку ефективності роботи дискових механізмів, розробку рекомендацій для оптимізації конструктивних і технологічних параметрів знарядь.

Останні наукові дослідження вказують на те, що правильне налаштування параметрів дискових робочих органів, таких як діаметр диска, кут атаки, радіус кривизни та інші конструктивні особливості, значно впливають на результати обробки ґрунту. Розробка аналітичної моделі дозволяє систематизувати знання про ці впливи, що у свою чергу допоможе в розробці більш ефективних і енергозберігаючих ґрунтообробних знарядь.

У цьому контексті, мета даного дослідження полягає у створенні та валідації аналітичної моделі для вивчення взаємодії дискового робочого органу з ґрунтом. Модель базується на фізичних і математичних принципах, що дозволяє здійснити точний аналіз процесів, що відбуваються при обробці ґрунту, та визначити оптимальні параметри для підвищення ефективності роботи ґрунтообробних знарядь [1-3].

2. Об'єкт і предмет дослідження

Об'єкт дослідження – дисковий робочий орган, який використовується в сільськогосподарській техніці для обробки ґрунту.

Предмет дослідження – процеси та механізми взаємодії дискового робочого органу з ґрунтом, включаючи фізичні і механічні характеристики взаємодії, вплив конструктивних особливостей дискового органу на обробку ґрунту, а також ефективність і продуктивність цих процесів у різних умовах.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є розробка аналітичної моделі для детального вивчення взаємодії дискового робочого органу з ґрунтом. Це дозволить прогнозувати ефективність роботи дискових механізмів, оптимізувати їх конструкцію та налаштування, а також покращити обробку ґрунту в агрономічних практиках.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **основні задачі**:

- **аналіз фізичних та механічних процесів.** Вивчити фізичні та механічні процеси, що відбуваються під час взаємодії дискового робочого органу з ґрунтом, зокрема сили, що виникають при обробці, і їх вплив на ґрунт;
- **розробка математичних моделей.** Розробити та валідувати математичні моделі, які описують взаємодію дискового робочого органу з різними типами ґрунтів;
- **оцінка конструктивних особливостей.** Дослідити вплив конструктивних особливостей дискового органу, таких як форма, розмір і кут нахилу диска, на ефективність обробки ґрунту;
- **визначення оптимальних умов роботи.** Визначити оптимальні умови для роботи дискового органу в різних типах ґрунтів, включаючи швидкість обробки та глибину занурення;
- **проведення експериментальних перевірок.** Перевірити точність і ефективність аналітичної моделі через експериментальні дані та порівняння з реальними результатами роботи дискових органів.

4. Аналіз літератури

Дослідженню контактної взаємодії дискових робочих органів ґрунтообробних знарядь, зокрема в аспекті підвищення їх ефективності при виконанні функцій призначення, присвячена значна кількість наукових праць [4-16]. Аналіз цих досліджень демонструє різноманітність підходів до вирішення наукових завдань у цій галузі. Зокрема, [4] досліджено вплив геометричних характеристик сферичного диска на силову взаємодію з ґрунтовим середовищем. Автор розробив рівняння руху матеріальної частинки по увігнутій сферичній поверхні дискового робочого органу та встановив закономірності впливу конструктивних і

технологічних параметрів на агротехнічні та енергетичні показники технологічного процесу. Враховуючи особливості взаємодії дискових робочих органів з ґрунтом, [5] проаналізовано питання формоутворення профіля дна борозни, величини гребнів. Значний інтерес для розвитку обраного напрямку досліджень представляють наукові праці [6, 7], в яких авторами представлені фізичні рівняння зв'язку напружень зі швидкостями деформацій для ґрунтового середовища при дії на нього дискового робочого органу. У [6] встановлено, що надмірне збільшення кута атаки α дисків ґрунтообробного знаряддя може призвести до їх забивання ґрунтом і рештками рослин. Тому граничне значення кута атаки, зокрема на луцильниках, не повинно перевищувати 35° . Дослідження також показало, що на якість обробки ґрунту та його енергоємність найбільший вплив мають діаметр диска (D), радіус його кривизни R , кут атаки α і кут нахилу осі обертання γ у вертикальній площині. Автори стверджують, що однаковий ефект можна досягти як зміною радіуса кривизни диска, так і зміною кута нахилу осі обертання γ , що дозволяє вибирати оптимальні параметри в залежності від конкретних умов використання ґрунтообробних знарядь з дисковими робочими органами.

Аналіз наукових робіт свідчить про необхідність подальшого дослідження процесу взаємодії дискових робочих органів з ґрунтовым середовищем. Зокрема, слід зосередитися на впливі конструктивних параметрів та режимів функціонування на покращення агрономічних і енергетичних показників ґрунтообробних знарядь.

5. Методи досліджень

Методи дослідження, що застосовуються у даній роботі, орієнтовані на досягнення поставленої мети і завдань.

Для розробки аналітичної моделі взаємодії дискового робочого органу з ґрунтом використовуються різноманітні методи, які дозволяють детально дослідити фізичні та механічні процеси, що відбуваються під час обробки ґрунту. Основні методи дослідження включають:

1) математичне моделювання:

- розробка математичних рівнянь. Формулювання рівнянь руху та взаємодії, які описують фізичні процеси, такі як сили тертя, напруження, деформація ґрунту та інші механічні ефекти;

- аналіз конструктивних параметрів. Включає діаметр диска, кут атаки, радіус кривизни, кут нахилу осі обертання тощо. Математичні моделі дозволяють визначити, як зміна цих параметрів впливає на ефективність обробки ґрунту;

2) числове моделювання і симуляція:

- метод кінцевих елементів (МКЕ). Використання числових методів для моделювання деформацій ґрунту та аналізу силових навантажень на дискові робочі органи. МКЕ дозволяє отримати детальні результати щодо розподілу напружень та деформацій;

- числове інтегрування рівнянь руху. Реалізація алгоритмів для симуляції динаміки взаємодії дискового органу з ґрунтом, враховуючи різні параметри і умови експлуатації;

3) експериментальні методи:

- лабораторні випробування. Проведення експериментів на модельних зразках для перевірки та варіації теоретичних моделей. Включає вимірювання сил, що виникають при обробці ґрунту, та оцінку ефективності роботи дискових органів;

- польові випробування. Оцінка реальної роботи дискових робочих органів в умовах практичного використання, що дозволяє перевірити модельні прогнози на практиці і виявити можливі відхилення від теоретичних результатів;

4) аналіз агрономічних і енергетичних показників:

- оцінка агрономічної ефективності. Аналіз впливу різних параметрів дискових органів на якість обробки ґрунту, таку як рівномірність розподілу, глибина обробки та інші показники;

– оцінка енергетичних витрат. Вимірювання і аналіз енергетичних витрат на обробку ґрунту для визначення ефективності та економічності роботи дискових знарядь;

5) аналіз чутливості:

– оцінка впливу варіацій параметрів. Дослідження, як зміна окремих параметрів дискових робочих органів впливає на результати обробки ґрунту, що дозволяє визначити оптимальні умови роботи і забезпечити максимальну ефективність.

Ці методи в комплексі дозволяють створити точну і надійну аналітичну модель для дослідження взаємодії дискових робочих органів з ґрунтом і забезпечити підвищення ефективності роботи ґрунтообробних знарядь.

6. Результати досліджень

Результати аналітичного дослідження взаємодії дискового робочого органу з ґрунтом на основі розробленої моделі дозволяють зробити ряд важливих висновків:

1) вплив конструктивних параметрів:

– діаметр диска (D). Збільшення діаметра диска веде до зменшення специфічного тиску на ґрунт, що може покращити якість обробки, зменшити пробивання ґрунту та знизити енергетичні витрати. Однак, існує оптимальний діаметр, при якому досягається максимальна ефективність;

– радіус кривизни (R). Зміна радіусу кривизни диска впливає на характер взаємодії з ґрунтом. Менший радіус забезпечує більш агресивну обробку, що може бути корисним при обробці важких ґрунтів, тоді як більший радіус зменшує опір і знижує знос;

– кут атаки (α). Встановлено, що надмірне збільшення кута атаки може призвести до забивання диска ґрунтом і рослинними рештками. Оптимальний кут атаки для дискових робочих органів становить до 35° , що забезпечує ефективну обробку без значного зростання енергетичних витрат;

– кут нахилу осі обертання (γ). Кут нахилу осі обертання також впливає на ефективність обробки. Результати показують, що однаковий ефект обробки можна досягти як за рахунок зміни радіуса кривизни диска, так і за допомогою зміни кута нахилу осі обертання;

2) взаємодія з ґрунтом:

– сили тертя і опору. Моделювання показало, що сили тертя між диском і ґрунтом значною мірою залежать від конструктивних параметрів диска і типу ґрунту. Це підтверджує важливість точного налаштування дискових органів для зменшення опору і підвищення ефективності обробки;

– деформація ґрунту. Результати числового моделювання і експериментальних випробувань демонструють, що дискові робочі органи ефективно розподіляють зусилля по поверхні ґрунту, забезпечуючи рівномірну обробку і покращення структури ґрунту;

3) енергетичні та агрономічні показники:

– енергетичні витрати. Визначено, що оптимальні параметри дискових робочих органів дозволяють зменшити енергетичні витрати на обробку ґрунту. Наприклад, зменшення кута атаки та вибір правильного радіуса кривизни диска дозволяють знижувати енергетичні витрати без втрати якості обробки;

– агрономічні результати. Моделювання і польові випробування показали, що оптимальні параметри диска забезпечують покращення якості обробки ґрунту, що може позитивно вплинути на врожайність і якість посівів;

4) рекомендації щодо конструкції:

– оптимальні параметри. На основі отриманих результатів розроблено рекомендації щодо оптимальних параметрів дискових робочих органів для різних типів ґрунтів і умов роботи. Це включає рекомендовані діаметри дисків, радіуси кривизни, кути атаки та нахилу осі обертання.

Ці результати підтверджують, що аналітична модель є ефективним інструментом для дослідження і оптимізації роботи дискових робочих органів. Вона дозволяє покращити як агрономічні, так і енергетичні показники ґрунтообробних знарядь, що може суттєво підвищити їх ефективність і економічність у сільськогосподарських процесах.

При моделюванні середовища нами прийняті такі припущення:

- ґрунт моделюється середовищем, що має внутрішнє тертя і питоме зчеплення, яке не залежить від зовнішнього тиску. Достатність даного допущення підтверджена [1, 5];
- ґрунт анізотропен – механічні властивості починаючи з деякої глибини не залежать від напряму заміру. Експериментальними дослідженнями [2] встановлено, що для більшості ґрунтів ця глибина становить 18–20 см;
- як показано [2] для тиску 0,3...0,5 МПа, а для ущільнених ґрунтів і до 0,7 МПа, залежність між деформацією і тиском можна вважати лінійною. Таким чином, для визначення діючих в модельному середовищі сил можна застосовувати теорію пружності;
- розгалуження тріщин (ліній сколу) у ґранті відбувається у поперечно-вертикальній площині - під кутом $\pi/2 + \varphi_2$ до леза долота, у поперечно вертикальній площині - під кутом φ_2 до вертикалі, де φ_2 - кут внутрішнього тертя ґрунту [4]. Первинний напрямок розповсюдження тріщини є пріоритетним і у процесі розповсюдження не змінюється [4];
- питоме зчеплення часток ґрунту є інтегральним показником, який визначає інші механіко-технологічні властивості.

Розглянемо механізм взаємодії з оброблюваним середовищем робочої поверхні довільної форми. На рис. 1. лінії АВ, ВС, СА - сліди перетину робочої поверхні з площинами координат. Напрямок руху співпадає з спрямуванням осі X.

Приймаємо, що ділянка ABC нескінченно мала, що дає нам підставу вважати сліди прямолінійними.

Виріжемо на поверхні ABC нескінченно малу прямокутну площадку DEFG.

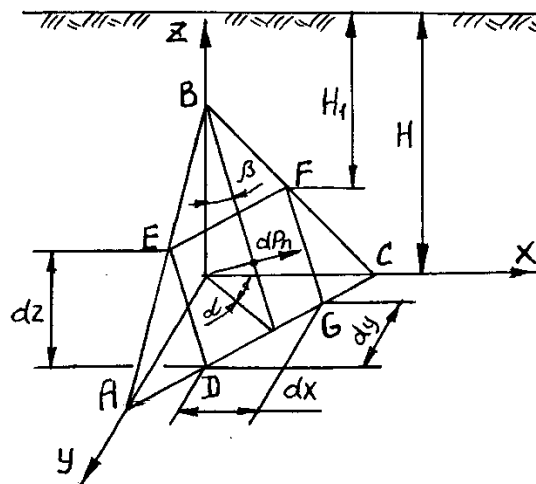


Рис. 1. Розрахункова схема взаємодії елементарної площадки з середовищем.

Таку елементарну площадку можна розглядати як підпорну стінку, на яку діє сила

$$P = P_n + P_{Tp} + P_D, \quad (1)$$

де P_n – підпорний боковий тиск;

P_{Tp} – сила тертя;

P_D – динамічна складова сил тиску.

У відповідності до [4] для нескінченно малої площадки рівняння підпорної стінки прийме вид (обґрунтування можливості застосування рівняння підпорної стінки на робочих швидкостях землерійних та ґрунтообробних машин дано у роботах [1, 4].

$$\begin{aligned}
 dP_n &= \frac{\gamma \cdot (H^2 - H_1^2)}{2} \cdot \left[\operatorname{tg}(45^\circ - \frac{\phi_2 - \beta}{2}) + \operatorname{tg} \beta \right]^2 \cdot \cos \beta \cdot (DG) = \\
 &= \frac{\gamma \cdot (H + H_1) \cdot (H - H_1)}{2 \cdot \cos \alpha} \cdot \left[\operatorname{tg}(45^\circ - \frac{\phi_2 - \beta}{2}) + \operatorname{tg} \beta \right]^2 \cdot \cos \beta \cdot dy = \\
 &= \frac{\gamma \cdot (2 \cdot H + dz) \cdot dz}{2 \cdot \cos \alpha} \cdot \left[\operatorname{tg}(45^\circ - \frac{\phi_2 - \beta}{2}) + \operatorname{tg} \beta \right]^2 \cdot \cos \beta \cdot dy,
 \end{aligned} \tag{2}$$

де $DG = dy/\cos \alpha$;

$H - H_1 = dz$;

γ – питома вага ґрунту;

β – кут постановки площадки до вертикалі;

H, H_1 – відповідно глибина розташування нижнього та верхнього обрізів площадки.

Зважаючи на малість величини dz з достатнім ступенем точності можна прийняти

$$dP_n = \frac{\gamma \cdot H}{\cos \alpha} \cdot \left[\operatorname{tg}(45^\circ - \frac{\phi_2 - \beta}{2}) + \operatorname{tg} \beta \right]^2 \cdot \cos \beta \cdot dy \cdot dz, \tag{3}$$

Що надає можливість перейти до єдиної форми запису диференціальних рівнянь.

Динамічну складову визначаємо за формулою [4]

$$dP_d = a \cdot b \cdot \gamma \cdot \frac{\sin \alpha_p \cdot \cos \theta}{\sin(\alpha_p + \theta)} \cdot V^2 = \gamma \cdot \frac{\sin \alpha_p \cdot \cos \theta}{\sin(\alpha_p + \theta)} \cdot V^2 \cdot dy \cdot dz, \tag{4}$$

де a, b – відповідно висота і ширина площадки;

α_p – кут різання;

θ – задній кут;

V – швидкість руху.

Рівняння (4) справедливе швидкості руху до 2,5 м/с. З урахуванням того, що методика пропонується для знарядь для поверхневого обробітку ґрунту, такий діапазон швидкості можна вважати задовільним.

Сумарний тиск, направлений по нормалі до площадки

$$\begin{aligned}
 dP_\Sigma &= \frac{\gamma \cdot H}{\cos \alpha} \cdot \left[\operatorname{tg}(45^\circ - \frac{\phi_2 - \beta}{2}) + \operatorname{tg} \beta \right]^2 \cdot \cos \beta \cdot dy \cdot dz + \gamma \cdot \frac{\sin \alpha_p \cdot \cos \theta}{\sin(\alpha_p + \theta)} \cdot V^2 \cdot dy \cdot dz = \\
 &= \gamma \cdot \left\{ \frac{H}{\cos \alpha} \cdot \left[\operatorname{tg}(45^\circ - \frac{\phi_2 - \beta}{2}) + \operatorname{tg} \beta \right]^2 \cdot \cos \beta + \frac{\sin \alpha_p \cdot \cos \theta}{\sin(\alpha_p + \theta)} \cdot V^2 \right\} \cdot dy \cdot dz.
 \end{aligned} \tag{5}$$

З розрахункової схеми (рис. 2) проекція нормально діючих сил на напрямок руху (вісь X)

$$\begin{aligned}
 dP_{\Sigma(x)} &= P_\alpha \cdot \cos \alpha = dP_\Sigma \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta = \\
 &= \gamma \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot \left\{ \frac{H}{\cos \alpha} \cdot \left[\operatorname{tg}(45^\circ - \frac{\phi_2 - \beta}{2}) + \operatorname{tg} \beta \right]^2 \cdot \cos \beta + \frac{\sin \alpha_p \cdot \cos \theta}{\sin(\alpha_p + \theta)} \cdot V^2 \right\} \cdot dy \cdot dz.
 \end{aligned} \tag{6}$$

У відповідності до розрахункової схеми (рис. 3).

Сила тертя

$$dP_{Tp} = \gamma \cdot \left\{ \frac{H}{\cos \alpha} \cdot \left[\operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\phi_2 - \beta}{2} \right) + \operatorname{tg} \beta \right]^2 \cdot \cos \beta + \frac{\sin \alpha_p \cdot \cos \theta}{\sin(\alpha_p + \theta)} \cdot V^2 \right\} \cdot \operatorname{tg} \phi_1 \cdot dy \cdot dz, \quad (7)$$

де ϕ_1 – кут зовнішнього тертя ґрунту по сталі.

Проекція сили тертя на напрямок руху

$$dP_{Tp(x)} = \gamma \cdot \sin \alpha \cdot \left\{ \frac{H}{\cos \alpha} \cdot \left[\operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\phi_2 - \beta}{2} \right) + \operatorname{tg} \beta \right]^2 \cdot \cos \beta + \frac{\sin \alpha_p \cdot \cos \theta}{\sin(\alpha_p + \theta)} \cdot V^2 \right\} \cdot \operatorname{tg} \phi_1 \cdot dy \cdot dz \quad (8)$$

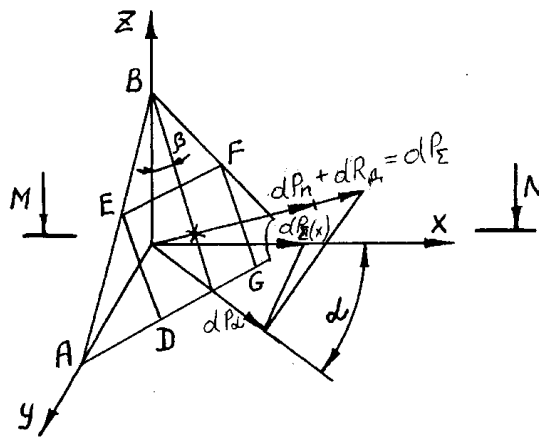


Рис. 2. Розрахункова схема до визначення проекції на напрямок руху нормально діючих сил.

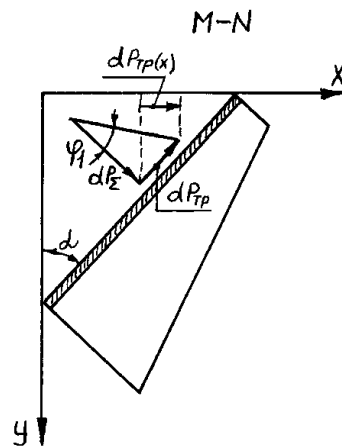


Рис. 3. Реакція сил тертя.

Тоді, проекція на напрямок руху всіх діючих сил

$$\begin{aligned} dP_T &= dP_{\Sigma(x)} + dP_{Tp(x)} = \\ &= \lambda \cdot \left\{ \frac{H}{\cos \alpha} \cdot \left[\operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\phi_2 - \beta}{2} \right) + \operatorname{tg} \beta \right]^2 \cdot \cos \beta + \frac{\sin \alpha_p \cdot \cos \theta}{\sin(\alpha_p + \theta)} \cdot V^2 \right\} \times \\ &\quad \times (\cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \phi_1) \cdot dy \cdot dz. \end{aligned} \quad (9)$$

Для визначення сумарної реакції поверхні робочого органа візьмемо інтеграл по поверхні від отриманого рівняння (9)

$$P = \gamma \cdot \iint_{\sigma} \left\{ \frac{H}{\cos \alpha} \cdot \left[\operatorname{tg}(45^\circ - \frac{\phi_2 - \beta}{2}) + \operatorname{tg} \beta \right]^2 \cdot \cos \beta + \frac{\sin \alpha_p \cdot \cos \theta}{\sin(\alpha_p + \theta)} \cdot V^2 \right\} \times (\cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \phi_1) \cdot dy \cdot dz. \quad (10)$$

де σ – рівняння поверхні.

Загальновідомі методики проектування ґрунтообробних робочих органів базуються на переміщенні у просторі прямолінійної утворюючої [4] це є часним випадком поверхні другого порядку. В загальному випадку утворююча не обов'язково повинна бути прямолінійною. Найпростіший вид поверхні другого порядку, яку можна розглядати як утворену переміщенням у просторі криволінійною утворюючою є сфера. Винайшовши рівняння утворюючої та закономірність її переміщення у просторі можна шляхом зміни параметрів отримати гаму поверхонь різної форми. Останнє разом з можливістю оцінки якості розпушення поверхнею довільної форми відкриває широкі можливості для адаптації поверхні до оброблюваного середовища. Розглянемо розрахункову схему, рис. 4 [4].

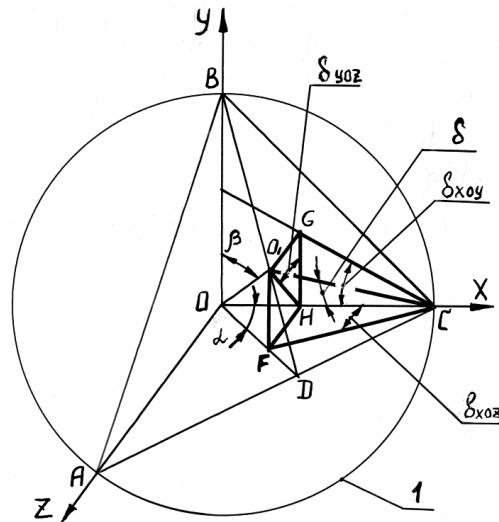


Рис. 4. Розрахункова схема сферичної поверхні [4].

Помістимо сферу в систему координат XYZ таким чином, щоб вісь сфери проходила через початок координат. З'єднавши точки перетину кромки 1 сфери з осями координат отримуємо трикутник ABC , який перетинає сферу під прямим кутом. Вісь сфери перетинає отриману площину трикутника в точці O_1 , з'єднавши яку з точкою C отримуємо пошукуваний кут атаки сфери δ при умові, що напрямок руху агрегату співпадає з віссю X .

Кут атаки має три складових у координатних площинах δ_{xoy} , δ_{xoz} , δ_{yoz} , які є відповідно кутами зсуву, розпушення, та обертання.

З трикутника FHC

$$HC = FH \cdot \operatorname{ctg} \delta_{xoz}. \quad (11)$$

З трикутника O_1GH

$$O_1H = \frac{FH}{\sin \delta_{yoz}}; \quad GH = FH \cdot \operatorname{ctg} \delta_{yoz}. \quad (12)$$

З трикутника HO_1C

$$HC = O_1H \cdot \operatorname{ctg} \delta = \frac{FH \cdot \operatorname{ctg} \delta}{\sin \delta_{YOZ}}. \quad (13)$$

З трикутника GHX

$$HC = HG \cdot \operatorname{ctg} \delta_{XOY}. \quad (14)$$

Вирішивши сумісно (11)...(14) отримаємо рівняння зв'язку

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta \cdot \sin \delta_{YOZ} &= \operatorname{tg} \delta_{XOZ}. \\ \operatorname{tg} \delta_{XOZ} &= \operatorname{tg} \delta_{XOY} \cdot \operatorname{tg} \delta_{YOZ}. \end{aligned} \quad (15)$$

Повернемо осі координат таким чином, щоб вісь OY співпала з віссю обертання диска OO_1 . Положення центру координат лишаємо не змінним.

Рівняння сфери у повернутій системі координат

$$X_1^2 + (R - Y_1)^2 + Z_1^2 = R^2, \quad (16)$$

де X_1, Y_1, Z_1 – координати повернутої системи;

R – радіус кривизни сфери.

Проте

$$X_1 = X \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta; Y_1 = Y \cdot \cos \beta; Z_1 = Z \cdot \cos \alpha. \quad (17)$$

Тоді, рівняння (16) при переході до первинної системи координат

$$(X \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta)^2 + (R - Y \cdot \cos \beta)^2 + (Z \cdot \cos \alpha)^2 = R^2. \quad (18)$$

За аналогією з полицею корпусу тракторного дискового знаряддя сліди перетину поверхні диска з площинами, що проведені паралельно дну борозни, є утворюючі робочої поверхні (рис. 5). Рівняння лінії AB перетину горизонтальної секучої площини з поверхнею сфери

$$(X \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta)^2 + (R - a \cdot \cos \beta)^2 + (Z \cdot \cos \alpha)^2 = R^2, \quad (19)$$

де a – відстань від площини перетину до площини XOZ

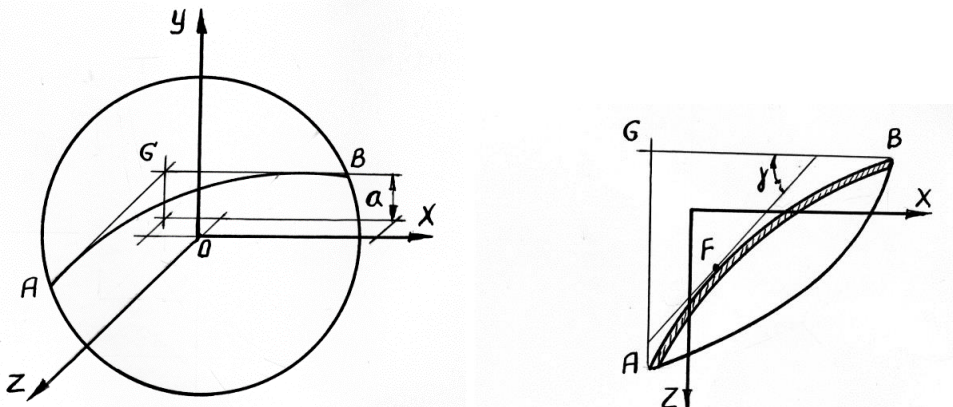


Рис. 5. Розрахункова схема до визначення рівняння горизонтальної утворюючої.

Після виконання необхідних математичних перетворень

$$Z = \sqrt{\frac{R^2 - (R - a \cdot \cos \beta)^2}{\cos^2 \alpha} - X^2 \cdot \cos^2 \beta}. \quad (20)$$

Як видно з отриманого рівняння, утворююча на відміну від утворюючої тракторного дискового знаряддя не є пряма лінія і кут її нахилу до стінки борозни буде змінним.

Миттєве значення тангенса кута нахилу дотичної у довільно взятій точці F

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{dZ}{dX} = - \frac{\cos^2 \beta \cdot X}{\sqrt{\frac{R^2 - (R - a \cdot \cos \beta)^2}{\cos^2 \alpha} - X^2 \cdot \cos^2 \beta}}. \quad (21)$$

Для отримання повністю детермінованої картини знайдемо рівняння утворюючої у повздовжно-вертикальній площині. Проводимо перетинаючу площину на відстані b від XOY (рис. 6).

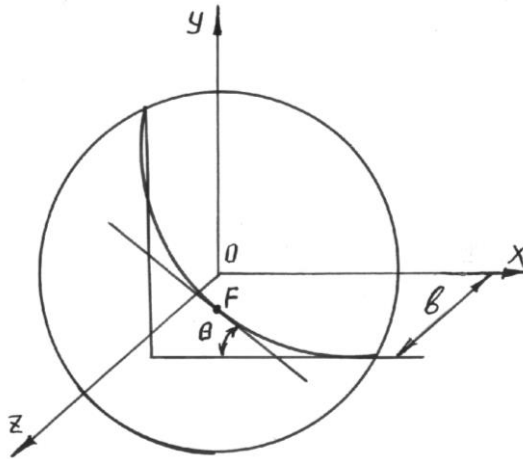


Рис. 6. Розрахункова схема до визначення кута θ .

Рівняння лінії перетину

$$(X \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta)^2 + (R - Y \cdot \cos \beta)^2 = R^2 - (b \cdot \cos \alpha)^2. \quad (22)$$

Після математичних перетворень

$$y^2 - \frac{2 \cdot R}{\cos \beta} \cdot y + x^2 \cdot \cos^2 \alpha + \frac{b^2 \cdot \cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} = 0, \quad (23)$$

Або

$$y_{1,2} = \frac{R}{\cos \beta} \pm \sqrt{\frac{R^2}{\cos^2 \beta} - x^2 \cdot \cos^2 \alpha - \frac{b^2 \cdot \cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta}}. \quad (24)$$

Миттєве значення кута нахилу до площини YOZ дотичної до утворюючої у довільно взятій точці

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{dy}{dx} = \pm \frac{x \cdot \cos^2 \alpha}{\sqrt{\frac{R^2}{\cos^2 \beta} - x^2 \cdot \cos^2 \alpha - \frac{b^2 \cdot \cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta}}}. \quad (25)$$

Точки перетину двох утворюючих однозначно визначають поверхню. Змінюючи параметри утворюючих можна отримати рівняння поверхні практично довільної форми. Обмеживши частину поверхні по вертикалі утворюючими 1-1 та 2-2, отримуємо робочу поверхню знаряддя, де заштрихована ділянка $DEFG$ відповідає елементарній ділянці розрахункової схеми, рис. 1 та рис. 2.

Змінюючи положення граничних утворюючих можна в межах ділянки 1-2-2-1 отримати поверхню з наперед обумовленими параметрами. Для аргументації положення граничних утворюючих розглянемо характерні точки на поверхні сфери.

Перш за все, на поверхні сфери існує крива, відносно якої кут дотичної $\theta = 90^\circ$, або $\operatorname{tg} \theta = \infty$. Умова буде виконуватись, якщо знаменник рівняння (25) буде дорівнювати нулю

$$\sqrt{\frac{R^2}{\cos^2 \beta} - x^2 \cdot \cos^2 \alpha - \frac{b^2 \cdot \cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta}} = 0. \quad (26)$$

Після математичних перетворень та з урахуванням (22) отримуємо систему рівнянь

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{\frac{R^2}{\cos^2 \alpha} - x^2 \cdot \cos^2 \beta}, \\ Y &= \frac{R}{\cos \beta}. \end{aligned} \quad (27)$$

Якщо проводити аналогію з корпусом плуга, то ту частину поверхні, що знаходиться нижче рівня $y = R/\cos \beta$ можна вважати лемешем, вище – полицею. Таким чином, якщо потрібно зробити розпушуюче знаряддя, то крива 3-3 повинна проходити нижче рівня $y = R/\cos \beta$, для збільшення обертаючої спроможності – вище.

Положення утворюючих 1-1 та 2-2 визначає діапазон зміни кута нахилу утворюючої до стінки борозни і залежить від швидкості руху агрегату. Сам діапазон повинен відповідати аналогічному показнику полиці корпусу плуга. Таким чином, наведена методика дозволяє використовувати загальні положення теорії розпушення ґрунту.

7. Перспективи подальшого розвитку досліджень

Розробка аналітичної моделі взаємодії дискового робочого органу з ґрунтом відкриває численні перспективи для подальших досліджень, які можуть значно покращити розпушування і ефективність ґрунтообробних процесів. Основні напрямки для майбутніх досліджень включають:

1) удосконалення математичних і числових моделей:

– розширення математичних моделей. Подальше вдосконалення моделей може включати врахування більш складних факторів, таких як неоднорідність ґрунту, змінність вологості та температура, а також вплив швидкості руху дискового органу;

– вдосконалення числових методів. Розробка і впровадження нових числових методів для точнішого моделювання взаємодії між дисковими органами і ґрунтом, а також для аналізу динамічних процесів;

2) інтеграція з сучасними технологіями:

– сенсорні технології і системи моніторингу. Інтеграція моделей з сучасними сенсорними системами та технологіями моніторингу може забезпечити реальний час збору даних про роботу дискових органів і ґрунтові умови. Це дозволить здійснювати оперативне коригування параметрів обробки;

– використання штучного інтелекту. Впровадження алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання для аналізу великих обсягів даних і оптимізації параметрів роботи дискових органів;

3) експериментальні дослідження і валідація:

– розширені польові випробування. Проведення додаткових польових випробувань в різних агрономічних і кліматичних умовах для перевірки та уточнення аналітичних моделей, а також для виявлення нових факторів, які можуть впливати на ефективність обробки ґрунту;

– дослідження довгострокового впливу. Оцінка довгострокового впливу різних параметрів дискових органів на структуру ґрунту, його родючість та здоров'я рослин;

4) аналіз впливу на навколишнє середовище:

– оцінка екологічних аспектів: Вивчення екологічного впливу різних режимів роботи дискових органів, включаючи можливі наслідки для збереження ґрунтів, зменшення ерозії та збереження біорізноманіття;

– розробка енергозберігаючих рішень. Розробка нових технологій і конструкцій, які дозволяють знижувати енергетичні витрати та викиди забруднюючих речовин в атмосферу;

5) оптимізація конструкції та технології:

– розробка нових матеріалів. Вивчення і впровадження нових матеріалів для виготовлення дискових органів, які можуть покращити їх зносостійкість та ефективність роботи;

– інноваційні конструкції. Розробка нових конструктивних рішень для дискових робочих органів, які забезпечують більш ефективне управління взаємодією з ґрунтом і поліпшують якість обробки;

6) міждисциплінарні дослідження:

– співпраця з агрономами та інженерами: Подальше дослідження можливостей інтеграції результатів з агрономічними практиками, включаючи оптимізацію технологій обробки ґрунту в контексті сучасних агрономічних потреб і умов.

Ці напрямки досліджень дозволять не тільки підвищити ефективність дискових робочих органів, але й забезпечити сталий розвиток ґрунтообробних технологій в умовах змінного клімату і сучасних агрономічних викликів.

8. Висновки

1. Точність аналітичних моделей. Розроблена аналітична модель взаємодії дискового робочого органу з ґрунтом продемонструвала свою ефективність у прогнозуванні і аналізі фізичних і механічних процесів. Модель дозволяє детально досліджувати вплив конструктивних параметрів, таких як діаметр диска, радіус кривизни, кут атаки і кут нахилу осі обертання, на ефективність обробки ґрунту та енергетичні витрати. Це забезпечує точний і надійний інструмент для оптимізації роботи дискових робочих органів.

2. Важливість конструктивних параметрів. Результати дослідження підтвердили, що конструктивні параметри дискових органів мають значний вплив на якість обробки ґрунту і енергетичні витрати. Оптимізація таких параметрів, як кут атаки та радіус кривизни, може суттєво покращити ефективність роботи ґрунтообробних знарядь і зменшити їх енергетичне навантаження.

3. Енергетична ефективність і агрономічні показники. Проведене моделювання і аналіз показали, що оптимальні параметри дискових робочих органів можуть знижувати енергетичні витрати на обробку ґрунту, при цьому покращуючи агрономічні показники, такі як якість обробки і структуру ґрунту. Це дозволяє досягти кращих результатів при зменшених витратах.

4. Перспективи для подальших досліджень. Подальші дослідження можуть зосередитися на удосконаленні математичних і числових моделей, інтеграції з сучасними технологіями, експериментальних перевірках, оцінці екологічних аспектів, оптимізації конструкцій і міждисциплінарних дослідженнях. Ці напрямки досліджень можуть допомогти забезпечити ще більшу точність моделей і поліпшити ефективність ґрунтообробних технологій.

5. Практичні рекомендації. Результати дослідження можуть бути використані для розробки нових конструкцій дискових робочих органів та вдосконалення існуючих знарядь. Рекомендації щодо оптимальних конструктивних параметрів можуть допомогти в розробці ефективніших і енергозберігаючих технологій обробки ґрунту.

Загалом, результати дослідження підтверджують важливість аналітичних моделей у вивченні взаємодії дискових робочих органів з ґрунтом і відкривають нові можливості для підвищення ефективності та економічності ґрунтообробних процесів.

Список літератури:

1) Гуков, Я. С. (2007). Обробіток ґрунту. Технологія і техніка. Механіко-технологічне обґрунтування енергозберігаючих засобів для механізації обробки ґрунту в умовах України : наукове видання. Київ : ДІА, 276 с.

2) Godwin R. J. (2007). A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces. *Soil and Tillage Research*. Vol. 97. P. 331–340.

3) Elvis López Bravo (2013). Simulation of Soil and Tillage-tool Interaction by the Discrete Element Method. Catholic University of Leuven Faculty of Bioscience Engineering. 130 p.

4) Шевченко, І. А. (2016). Керування агрофізичним станом ґрунтового середовища. Київ : Видавничий дім «Вініченко», 320 с.

5) Бакум, М. В., Ящук, Д. А. (2011). Проектування ґрунтообробних машин з дисковими робочими органами. Навчальний посібник. Харків: ХНТУСГ, 34 с.

6) Гуцол, О. П., Ковбаса, В. П. (2016). Обґрунтування параметрів і режимів руху ґрунтообробних машин з дисковими робочими органами: Монографія. Київ, 145 с.

7) Ковбаса, В. П., Войтюк, Д. Г., Короткевич, П. С., Мартишко, В. М. Ковбаса, В. П. (1997). Моделювання процесу взаємодії робочих органів сільськогосподарських машин з ґрунтом. *Науковий вісник НАУ*. Київ. Вип. 2. С. 117–123.

8) Кушнар'єв С. А., Погорілий В. В., Чуб С. А. (2008). Кінематика точок сферичних дисків ґрунтообробного знаряддя при взаємодії з ґрунтом. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка*. Вип.75. Т.1. Харків, С.121–127.

9) Yun Zhang (2016). On the Mechanics of Disc-Soil-Planter Interaction. A Thesis Submitted to the College of Graduate Studies and Research In Partial Fulfillment of the Requirements For the Degree of Master of Science In the Department of Mechanical Engineering University of Saskatchewan Saskatoon. 219.

10) Omer A. Abdalla, Eman A. Mohamed, Ahmed M. El Naim, Mohammed A. El Shiekh, Moayad B. Zaid. (2014). Effect of disc and tilt angles of disc plough on tractor performance under clay soil. *Current Research in Agricultural Sciences*. Vol. 1, No. 3, P. 83–94.

11) Грушецький, С. М., Гогот, П. М. (2019). Тенденції розвитку конструкцій дискових ґрунтообробних знарядь для поверхневого обробки ґрунту. Матеріали V Всеукр. наук.-прак. конф., «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь» : зб. наук. праць / за заг. ред. С.С. Добранський. – Житомир : АТК, С. 40-42.

12) Корчак, М., Рудь, А., Грушецький, С., Павельчук, Ю. (2023). Обґрунтування дискового робочого органа комбінованого способу обробітку ґрунту та процесу розрізання рослинних залишків кукурудзи. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Агроінженерні дослідження*, (26), 30–36. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2022.26.030>.

13) Грушецький, С. М., Назар, С. М. (2021). Дослідження дискових ґрунтообробних знарядь для поверхневого обробітку ґрунту: *матеріали VII всеукр. наук.-прак. конф., «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»* : зб. наук. праць / за заг. ред. С.С. Добранський. Житомир : АТК, С. 44-46.

14) Корчак, М. М., Грушецький, С. М. (2021). Теоретическое обоснование дискового рабочего органа для качественного разрезания стеблевых остатков кукурузы. *Технічна інженерія / Державного університету «Житомирська політехніка»*. Житомир, № 2 (88), С. 25-35. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2021-2\(88\)-25-35](https://doi.org/10.26642/ten-2021-2(88)-25-35).

15) Боднарук, Б. І. Грушецький, С. М. (2024). Знаряддя та їх класифікація для обробітку ґрунту зі сферичними дисковими робочими органами. *Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь* : матеріали X Міжнар. наук.-прак. конф., м. Житомир, 18 квіт. 2024 р. Житомир : АТК, С. 40-42.

16) Боднарук, Б. І. (2024). Опис конструкції обробки ґрунту за допомогою дискових знарядь. *Перші наукові кроки – 2024*: збірник наукових праць XVIII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих науковців (18 квітня 2024 р., м. Кам'янець-Подільський). Кам'янець-Подільський, С. 26.

Model of analytical study of the interaction of the disc working body with the soil

Sergii Hrushetskyi

Department of Agricultural Engineering and Systems Engineering named after Mykhailo Samokysh, Institution of Higher Education "Podilskyi State University", Kamianets-Podilskyi, Ukraine

ORCID 0000-0002-0487-6152

Bohdan Bodnaruk

Department of Agricultural Engineering and System Engineering named after Mykhailo Samokysh, Institution of Higher Education "Podilskyi State University", Kamianets-Podilskyi, Ukraine

ORCID 0000-0002-0487-6152

Abstract: This work presents a model of analytical research of the interaction of the disc working body with the soil. The model is aimed at studying the physical and mechanical processes that occur during the operation of the disk organ in the soil. The main goal of the research is to accurately predict the efficiency of disk mechanisms, analyze their impact on the soil structure, and determine the optimal conditions for ensuring high agronomic indicators. The work considers mathematical models that take into account various factors, such as soil density, processing speed, and design features of disc bodies. The results of the research make it possible to improve the design and adjustment of agricultural machinery, as well as contribute to increasing its productivity and reducing resource consumption.

Keywords: model, analytical study, interaction, disk working body, soil.
