



УДК 631.313

О. В. Козаченко, д.т.н.

ORCID: 0000-0003-1326-4307

К. В. Сєдих, к.т.н.

ORCID: 0000-0002-5720-8430

О. М. Волковський

ORCID: 0009-0006-5516-0601

Державний біотехнологічний університет

e-mail: o.v.kozachenko21@gmail.com, тел.: 099-761-49-17

ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ СИЛОВОЇ ВЗАЄМОДІЇ ДИСКОВОГО РОБОЧОГО ОРГАНУ З ҐРУНТОВИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

Анотація. В статті висвітлено результати теоретичних досліджень взаємодії дискового робочого органу ґрунтообробного знаряддя із ґрунтовим середовищем. Виконано математичне моделювання переміщення елементарної частинки ґрунту по сферичній поверхні дискового робочого органу задля визначення лінії та площі контакту ґрунтового середовища із поверхнею диска, що здійснюється із урахуванням силового впливу скиби ґрунту, яка утворюється на робочій сферичній поверхні диску, сили Коріоліса та відцентрової сили, які зумовлені його обертальним рухом при виконанні технологічного процесу, та у відповідності до обраних конструктивних параметрів - радіуса сферичної поверхні R диска та його діаметра d , кута атаки α і кута нахилу γ у вертикальній площині та глибини h обробітку ґрунту. Застосуванням відомих аналітичних закономірностей щодо компонентів нормальних напружень пружно-в'язко-пластичного ґрунтового середовища та програмного пакету Mathematica визначено залежності проєкцій сили опору робочого органу дискового знаряддя від обраних конструктивних параметрів, глибини h обробітку ґрунту та швидкості руху.

Ключові слова: дисковий робочий орган, ґрунтове середовище, сферичний диск, конструктивні параметри, кут атаки, кут нахилу.

Постановка проблеми. Забезпечення якості поверхневого обробітку ґрунту при мінімізації енергетичних витрат на виконання технологічного процесу у прогресивних технологіях рослинництва зумовлює широке застосування ґрунтообробних знарядь на основі дискових робочих органів. Враховуючи той факт, що означені показники залежать від конструктивного виконання робочих органів та властивостей ґрунту, важливим і актуальним аспектом залишається



дослідження механіки їх контактної взаємодії для удосконалення та створення нових високоефективних ґрунтообробних знарядь [1-3].

Аналіз останніх досліджень. Дослідженню контактної взаємодії дискових робочих органів ґрунтообробних знарядь в напрямку підвищення їх ефективності при виконанні функцій призначення присвячена значна кількість наукових праць [4-10]. Їх аналіз вказує на індивідуальність підходів вирішення наукових задач. Зокрема, в [4] автором досліджено вплив геометричних характеристик сферичного диска на силову взаємодію із ґрунтовим середовищем. При цьому одержано рівняння руху матеріальної частинки по увігнутій сферичній поверхні дискового робочого органу, встановлено закономірності впливу конструктивно-технологічних параметрів на агротехнічні та енергетичні показники технологічного процесу. Враховуючи особливості взаємодії дискових робочих органів з ґрунтом, в [5] проаналізовано питання формоутворення профіля дна борозни, величини гребенів. 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. В [6] авторами встановлено, що надмірне збільшення кута атаки α дисків ґрунтообробного знаряддя може призводити до їх забивання ґрунтом і пожнивними рештками, тому значення граничного кута атаки, зокрема, на луцильниках не повинен перевищувати 35° . Авторами встановлено, що на якість виконання процесу обробітку ґрунту та його енергоємність для аналогічних механічних властивостей ґрунту найбільш суттєвий вплив мають діаметр диска D , радіус його кривизни R , кут атаки α і кут нахилу γ у вертикальній площині. При цьому автори стверджують, що однаковий ефект може бути досягнутий як зміною радіуса кривизни диска, так і кутом нахилу осі обертання γ , що дає можливість вибирати раціональні параметри, виходячи з конкретних умов використання ґрунтообробних знарядь на основі дискових робочих органів.

Проаналізовані наукові роботи вказують на доцільність подальшого вивчення процесу взаємодії дискових робочих органів з ґрунтовим середовищем, впливу конструктивних параметрів та режимів функціонування задля підвищення агрономічних та енергетичних показників ґрунтообробних знарядь.

Формулювання мети статті. Теоретично дослідити процес взаємодії ґрунтового середовища з дисковим робочим органом ґрунтообробного знаряддя і визначити складові сили опору.

Основна частина. Розглянемо частинку P ґрунту масою m_p , що здійснює рух по поверхні дискового робочого органу, який

представляється двовимірною сферою радіусом R з центром в точці O , що обмежена колом діаметром d з центром в точці O' (рис. 1). Дісковий робочий орган виконує поступальний рух вздовж вісі $O'X$ зі швидкістю V і обертовий вздовж вісі $O'O$ з кутовою швидкістю ω . Площина дискового робочого органу знаходиться під кутом до напрямку його руху $O'X$ (кут атаки α) і під кутом до вертикальної осі $O'Z$ (кут нахилу γ). Кут між віссю $O'O$ складає з віссю Oz кут $(90^\circ - \gamma)$. Глибина обробітку ґрунту складає h , яка визначається від нижньої точки D дискового робочого органу до горизонтальної поверхні ґрунту ACX .

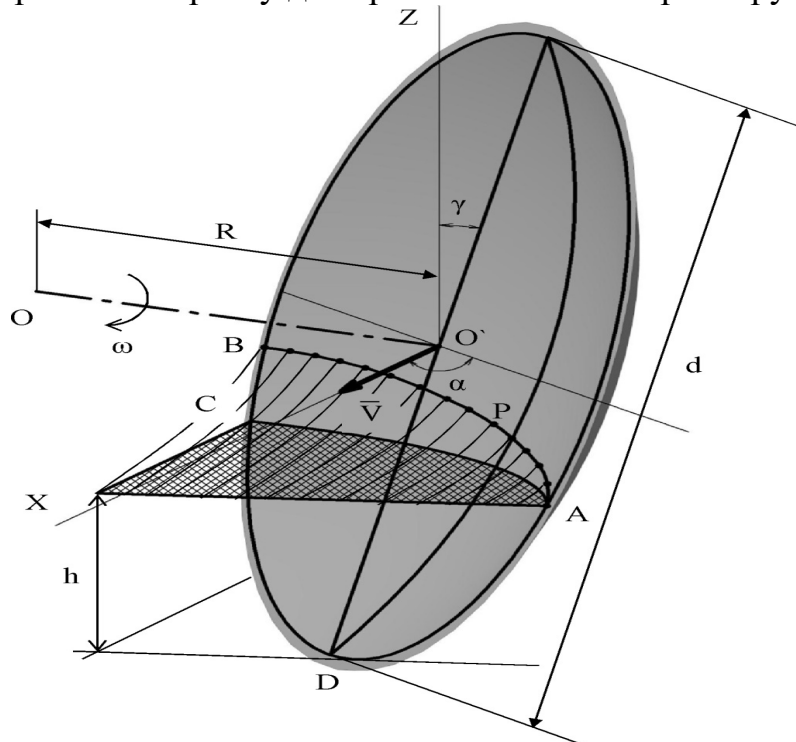


Рисунок 1. Розрахункова схема дискового робочого органу

При взаємодії поверхні робочого органу із ґрунтовим середовищем виникає лінія їх контакту AB (рис. 1), на якій спостерігається положення рівноваги частинок ґрунту. Лінія AC характеризує горизонтальну площину перетину поверхні робочого органу дискатора із горизонтальною поверхнею ґрунтового середовища. Зміщення ґрунту від лінії AC до лінії AB відбувається під дією сили підпору шару ґрунту, що напливає на дисковий робочий орган, і відцентровою силою та силою Коріоліса, що виникають в результаті його обертання. При цьому контакт ґрунтового середовища із поверхнею робочого органу дискатора відбувається за криволінійною поверхнею $ABCD$.

Радіус R сфери можна визначити за формулою [5]:

$$R = \frac{d}{2 \sin \zeta}, \quad (1)$$

де ζ – половина кута при вершині сектора дискового робочого органу, °:

Модуль вектора кутової швидкості частинки, що знаходиться на диску, згідно досліджень [6], визначається залежністю

$$\omega = \frac{2V}{\mu d \cos \alpha \cos \gamma}, \quad (2)$$

де μ – коефіцієнт ковзання диску при його обертанні.

Розглянемо процес переміщення частинки ґрунту Р масою m_p по поверхні робочого органу дискатора. Для цього введемо абсолютну систему координат $Oxyz$, в якій площина Oxy є горизонтальною, а третя вісь Oz спрямована вертикально вгору (рис. 2).

Відстань від початку координат до частинки ґрунту будемо задавати радіус-вектором $\vec{r}$. На частинку ґрунту масою m_p діють: сила інерції $m_p \ddot{\vec{r}}$; сила тяжіння $m_p \vec{g}$; сила Коріоліса $\vec{F}_k = -2m_p [\vec{\omega}, \dot{\vec{r}}]$; сила реакції поверхні диску $\vec{N}$; сила тертя ковзання $\vec{F}_\mu = \mu |\vec{N}| \frac{\dot{\vec{r}}}{|\dot{\vec{r}}|}$; відцентрова

сила $\vec{F}_\omega = m_p \omega^2 \cdot \vec{r}$; сила підпору шару ґрунту [6] $\vec{F}_n = m_p \frac{q}{\rho} \left(1 - \frac{\dot{\vec{r}}}{V} \right)$, де q – коефіцієнт об'ємного стиску ґрунту, m^3 ; ρ – об'ємна вага ґрунту, kg/m^3 .

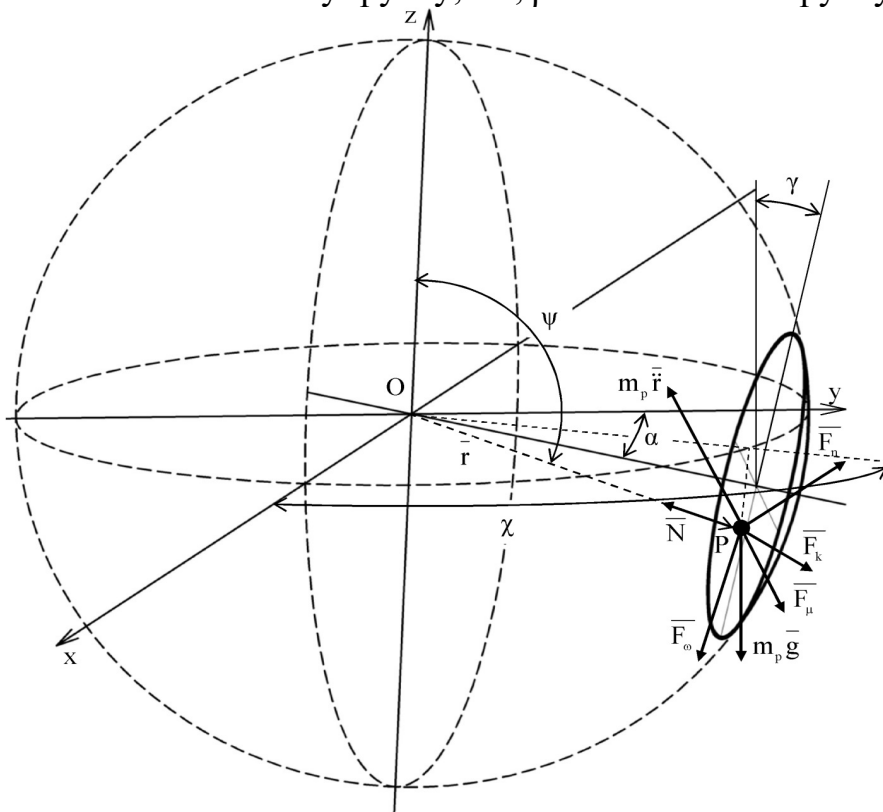


Рисунок 2. Схема сил, що діють на частинку ґрунту в точці Р на сфері, що задається сферичними координатами (ψ, χ)



Положення точки на сфері будемо встановлювати за допомогою сферичних кутів ψ і χ : $\psi_{\min} \leq \psi \leq \psi_{\max}$, $\chi_{\min} \leq \chi \leq \chi_{\max}$ (рис. 2), де

$$\psi_{\min} = \frac{\pi}{2} + \gamma - \zeta = \frac{\pi}{2} + \gamma - \arcsin \frac{d}{2R}, \quad (3)$$

$$\psi_{\max} = \frac{\pi}{2} + \gamma + \zeta = \frac{\pi}{2} + \gamma + \arcsin \frac{d}{2R}, \quad (4)$$

$$\chi_{\min} = \frac{\pi}{2} + \alpha - \zeta = \frac{\pi}{2} + \alpha - \arcsin \frac{d}{2R}, \quad (5)$$

$$\chi_{\max} = \frac{\pi}{2} + \alpha + \zeta = \frac{\pi}{2} + \alpha + \arcsin \frac{d}{2R}. \quad (6)$$

Значення абсолютної швидкості $\bar{v} = \dot{\vec{r}}$ частинки ґрунту Р у сферичних координатах записується наступним чином

$$\bar{v} = v_{\psi} \bar{e}_{\psi} + v_{\chi} \bar{e}_{\chi}, \quad (7)$$

де $v_{\psi} = R\dot{\psi}$, $v_{\chi} = R \sin \psi \dot{\chi}$ – проекції швидкості частинки ґрунту Р у сферичних координатах, м/с;
 $\bar{e}_{\psi}$, $\bar{e}_{\chi}$ – одиничні вектори сферичних координат.

Швидкість частинки ґрунту Р відносно диска, що обертається, набуває вигляду

$$\bar{v}' = v'_{\psi} \bar{e}_{\psi} + v'_{\chi} \bar{e}_{\chi}, \quad (8)$$

де $v'_{\psi} = R\dot{\psi} + R\omega \sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) \sin \chi = R\dot{\psi} + R\omega \cos \gamma \sin \chi$,
 $v'_{\chi} = R \sin \psi \dot{\chi} + R\omega \sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) \cos \psi \cos \chi - R\omega \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) \sin \psi =$
 $= R \sin \psi \dot{\chi} + R\omega \cos \gamma \cos \psi \cos \chi - R\omega \sin \gamma \sin \psi.$

У координатах (ψ, χ) рівняння ковзання частинки ґрунту Р по сфері залишимо у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_p R (-\sin^2 \psi \ddot{\chi} - \dot{\psi}^2) = -m_p g \cos \psi + N, \\ m_p R (\ddot{\psi} - \sin \psi \cos \psi \dot{\chi}^2) = m_p g \sin \psi + m_p \frac{q}{\rho} \left(1 - \frac{R\dot{\psi} + R\omega \cos \gamma \sin \chi}{V} \right. \\ \left. - \mu N (R\dot{\psi} + R\omega \cos \gamma \sin \chi) \div \right. \\ \left. \div \sqrt{(R\dot{\psi} + R\omega \cos \gamma \sin \chi)^2 + (R \sin \psi \dot{\chi} - R\omega \sin \gamma \sin \psi + R\omega \cos \gamma \cos \psi \sin \chi)^2} \right) \\ m_p R (\sin \psi \ddot{\chi} + 2\dot{\chi} \dot{\psi} \cos \psi) = \\ = m_p \frac{q}{\rho} \left(1 - \frac{R \sin \psi \dot{\chi} - R\omega \sin \gamma \sin \psi + R\omega \cos \gamma \cos \psi \sin \chi}{V} \right) - \\ - \mu N (R \sin \psi \dot{\chi} - R\omega \sin \gamma \sin \psi + R\omega \cos \gamma \cos \psi \sin \chi) \div \\ \div \sqrt{(R\dot{\psi} + R\omega \cos \gamma \sin \chi)^2 + (R \sin \psi \dot{\chi} - R\omega \sin \gamma \sin \psi + R\omega \cos \gamma \cos \psi \sin \chi)^2} \end{array} \right. \quad (9)$$



Перше рівняння системи (9), що виражає проекцію рівнянь Ньютона на нормаль до поверхні сфери, дозволить знайти нормальну реакцію N . Друге і третє рівняння системи (9) задають рух в проекції на осі з одиничними векторами $\overline{e_\psi}$, $\overline{e_\chi}$.

Для визначення положення рівноваги частинки ґрунту щодо абсолютного простору покладемо для цього $\dot{\psi} = 0$ і $\dot{\chi} = 0$:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = -m_p g \cos \psi + N, \\ 0 = m_p g \sin \psi + m_p \frac{q}{\rho} \left(1 - \frac{R\omega \cos \gamma \sin \chi}{V} \right) - \\ \quad - \frac{\mu N R \omega \cos \gamma \sin \chi}{\sqrt{(R\omega \cos \gamma \sin \chi)^2 + (-R\omega \sin \gamma \sin \psi + R\omega \cos \gamma \cos \psi \sin \chi)^2}}, \\ 0 = m_p \frac{q}{\rho} \left(1 - \frac{-R\omega \sin \gamma \sin \psi + R\omega \cos \gamma \cos \psi \sin \chi}{V} \right) - \\ \quad - \frac{\mu N (-R\omega \sin \gamma \sin \psi + R\omega \cos \gamma \cos \psi \sin \chi)}{\sqrt{(R\omega \cos \gamma \sin \chi)^2 + (-R\omega \sin \gamma \sin \psi + R\omega \cos \gamma \cos \psi \sin \chi)^2}} \end{array} \right. \quad (10)$$

Виражаючи з першого рівняння системи N і підставляючи в друге і третє отримуємо

$$\left\{ \begin{array}{l} N = m_p g \cos \psi, \\ 0 = m_p g \sin \psi + m_p \frac{q}{\rho} \left(1 - \frac{R\omega \cos \gamma \sin \chi}{V} \right) - \\ \quad - \frac{\mu m_p g \cos \psi R \omega \cos \gamma \sin \chi}{\sqrt{(R\omega \cos \gamma \sin \chi)^2 + (-R\omega \sin \gamma \sin \psi + R\omega \cos \gamma \cos \psi \sin \chi)^2}}, \\ 0 = m_p \frac{q}{\rho} \left(1 - \frac{-R\omega \sin \gamma \sin \psi + R\omega \cos \gamma \cos \psi \sin \chi}{V} \right) - \\ \quad - \frac{\mu m_p g \cos \psi (-R\omega \sin \gamma \sin \psi + R\omega \cos \gamma \cos \psi \sin \chi)}{\sqrt{(R\omega \cos \gamma \sin \chi)^2 + (-R\omega \sin \gamma \sin \psi + R\omega \cos \gamma \cos \psi \sin \chi)^2}} \end{array} \right. \quad (11)$$

Перетворивши рівняння (11) і підставивши (2) маємо

$$\left\{ \begin{aligned} \sin \psi + \frac{q}{\rho g} \left(1 - \frac{\sin \chi}{\mu \cos \alpha \sin \zeta} \right) &= \\ &= \frac{\mu \cos \psi \cos \gamma \sin \chi}{\sqrt{(\cos \gamma \sin \chi)^2 + (\cos \gamma \cos \psi \sin \chi - \sin \gamma \sin \psi)^2}}, \\ \frac{q}{\rho g} \left(1 - \frac{\cos \gamma \cos \psi \sin \chi - \sin \gamma \sin \psi}{\mu \cos \alpha \cos \gamma \sin \zeta} \right) &= \\ &= \frac{\mu \cos \psi (\cos \gamma \cos \psi \sin \chi - \sin \gamma \sin \psi)}{\sqrt{(\cos \gamma \sin \chi)^2 + (\cos \gamma \cos \psi \sin \chi - \sin \gamma \sin \psi)^2}}. \end{aligned} \right. \quad (12)$$

Систему рівнянь (12) відносно ψ і χ будемо вирішувати в програмному пакеті Mathematica. Приймаючи $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, $q = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}^3$ [4]; $\rho = 1340 \text{ кг/м}^3$; $\alpha = 15^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $d = 0,4 \text{ м}$; $R = 0,66 \text{ м}$; $h = 0,1 \text{ м}$ отримуємо графічну інтерпретацію дискового робочого органу і лінії контакту з ґрунтовим середовищем (рис. 3). При цьому рівняння лінії контакту робочого органу з ґрунтовим середовищем можна представити, як в параметричному так і в звичайному вигляді:

$$\left\{ \begin{aligned} x(t) &= -0,320752 + 0,000978761 t + 8,63534 \cdot 10^{-6} t^2 - 2,2426 \cdot 10^{-8} t^3, \\ y(t) &= 0,542725 + 0,000708602 t + 1,12761 \cdot 10^{-6} t^2 - 1,46553 \cdot 10^{-8} t^3, \\ z(t) &= -0,179942 - 0,00023068 t + 2,1464 \cdot 10^{-6} t^2 - 1,19451 \cdot 10^{-8} t^3; \end{aligned} \right. \quad (13)$$

$$z(x, y) = 0,719908 + 1,45223 x + 2,57464 x^2 - 5,72681 y - 2,29588 x y + 6,77665 y^2. \quad (14)$$

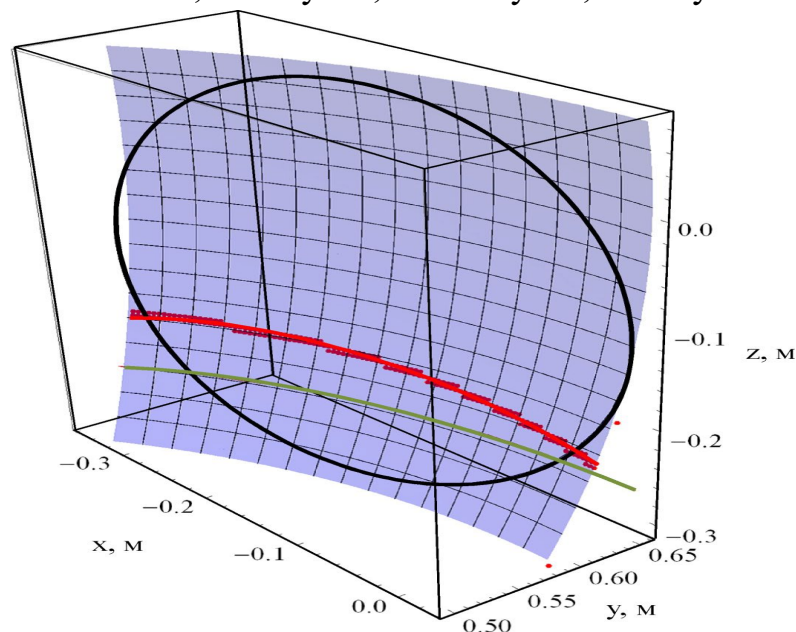


Рисунок 3. Графічна інтерпретація дискового робочого органу і лінії контакту з ґрунтовим середовищем



Для знаходження площі контакту ґрунтового середовища і робочого органу дискового ґрунтообробного знаряддя скористаємося відомою формулою [9]:

$$S = \iint_{ABCD} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} dx dy \quad (15)$$

де ABCD – фігура, що обмежена лініями: рівнянням (14) і колом діаметром d із центром в точці:

$$\begin{aligned} x_c &= R \sin\left(\frac{\psi_{\max} + \psi_{\min}}{2}\right) \cos\left(\frac{\chi_{\max} + \chi_{\min}}{2}\right), \\ y_c &= R \sin\left(\frac{\psi_{\max} + \psi_{\min}}{2}\right) \sin\left(\frac{\chi_{\max} + \chi_{\min}}{2}\right), \\ z_c &= R \cos\left(\frac{\psi_{\max} + \psi_{\min}}{2}\right). \end{aligned} \quad (16)$$

Тоді рівняння нижньої частини зазначеного кола має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} z = & -\sqrt{\frac{d^2}{4} - \left(x - R \sin\left(\frac{\psi_{\max} + \psi_{\min}}{2}\right) \cos\left(\frac{\chi_{\max} + \chi_{\min}}{2}\right)\right)^2} + \\ & + \sqrt{\left(x - R \sin\left(\frac{\psi_{\max} + \psi_{\min}}{2}\right) \sin\left(\frac{\chi_{\max} + \chi_{\min}}{2}\right)\right)^2} + R \cos\left(\frac{\psi_{\max} + \psi_{\min}}{2}\right). \end{aligned} \quad (17)$$

З використанням розробленої програми в програмному пакеті Mathematica було проведено варіювання глибини обробки ґрунту h від 0,03 м до 0,12 м, кута атаки α і кута нахилу γ робочого органу дискового знаряддя в діапазоні від 0° (0 рад) до 30° ($\pi/6$ рад) і визначені значення площі контакту S . Апроксимуючи отримані дані отримано рівняння регресії другого порядку для двох факторів (рис. 4):

$$\begin{aligned} S(h, \alpha, \gamma) = & -0,00185791 + 0,224608 h + 0,572986 h^2 + 0,00433771 \beta + \\ & + 0,108132 h \alpha + 0,0111632 \alpha^2 + 0,00143915 \gamma + 0,0182 h \gamma + \\ & + 0,00197823 \alpha \gamma - 0,000297924 \gamma^2. \end{aligned} \quad (18)$$

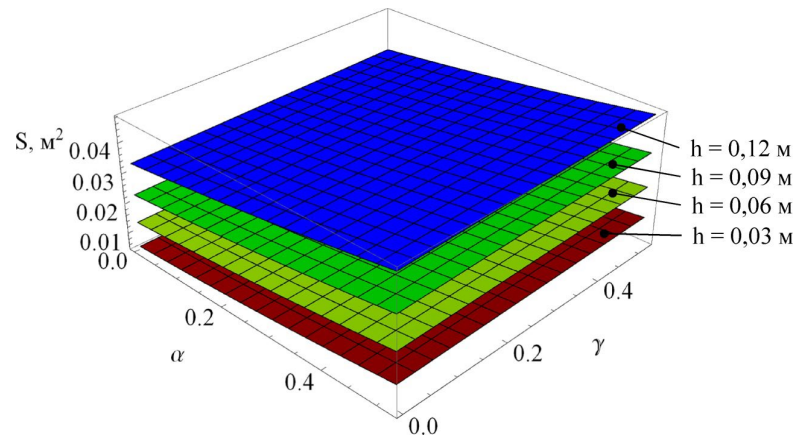


Рисунок 4. Залежність площі контакту ґрунтового середовища і робочого органу дискатора від його кутів атаки α і нахилу γ та глибини обробітку ґрунту h

Для визначення сили опору ґрунтового середовища при дії на нього дискового робочого органу використаємо результати досліджень [6], а саме аналітичні залежності компонентів нормальних напружень для пружно-в'язко-пластичного ґрунтового середовища:

$$\sigma_x = \frac{2}{9} \mu \left(3e^{\frac{2K_2(1+\nu)}{3(-1+2\nu)}} (2\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_y - \dot{\epsilon}_z) - \frac{e^{K_2}(1+\nu)(\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z)}{-1+2\nu} \right) \quad (19)$$

$$\sigma_y = \frac{2}{9} \mu \left(3e^{\frac{2K_2(1+\nu)}{3(-1+2\nu)}} (2\dot{\epsilon}_y - \dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_z) - \frac{e^{K_2}(1+\nu)(\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z)}{-1+2\nu} \right) \quad (20)$$

$$\sigma_z = \frac{2}{9} \mu \left(3e^{\frac{2K_2(1+\nu)}{3(-1+2\nu)}} (2\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_y - \dot{\epsilon}_x) - \frac{e^{K_2}(1+\nu)(\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z)}{-1+2\nu} \right) \quad (21)$$

$$K_2 = - \frac{27L(-1+2\nu) \left(\tau_0 \cos \kappa + \frac{2e^{K_1} \mu (1+\nu)(\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z) \sin \kappa}{9-18\nu} \right)}{4\sqrt{2} \mu (1+\nu) \sqrt{\frac{E(-1+\nu)}{(-1+\nu+2\nu^2)\rho}} (-3+\sin \kappa)} \quad (22)$$

$$K_1 = - \frac{EL}{\mu(1+\nu) \sqrt{\frac{E(-1+\nu)}{(-1+\nu+2\nu^2)\rho}}} \quad (23)$$

де σ_x , σ_y , σ_z – компоненти напружень, Па; $\dot{\epsilon}_x, \dot{\epsilon}_y, \dot{\epsilon}_z$ – компоненти швидкостей відносних деформацій, 1/с;

ν – коефіцієнт Пуассона;

E – модуль пружності лінійних деформацій, Па;

μ – коефіцієнт в'язкості зсувних деформацій, Па·с;

κ – коефіцієнт внутрішнього тертя ґрунту;

τ_0 – напруження початкового зсуву ґрунту, Па;



L – відстань, на якій затухає хвиля напружень у ґрунті, м;

ρ – щільність ґрунту, кг/м^3 .

Проекцію сили опору на вісі Ox , Oy , Oz можна визначити за формулами:

$$F_x = \iint_{ABCD} \sigma_x dydz, \quad (24)$$

$$F_y = \iint_{ABCD} \sigma_y dx dz, \quad (25)$$

$$F_z = \iint_{ABCD} \sigma_z dx dy, \quad (26)$$

де $ABCD$ – фігура що обмежена лініями: рівнянням (13) і (16)

Для переводу декартових координат у сферичні використовується наступні залежності:

$$\begin{aligned} x &= R \sin \psi \cos \chi, \\ y &= R \sin \psi \sin \chi, \\ z &= R \cos \psi. \end{aligned} \quad (27)$$

Для похідних за часом і диференціалів отримуємо:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= R \dot{\psi} \cos \psi \cos \chi - R \dot{\chi} \sin \psi \sin \chi, \\ \dot{y} &= R \dot{\psi} \cos \psi \sin \chi + R \dot{\chi} \sin \psi \cos \chi, \\ \dot{z} &= -R \dot{\psi} \sin \psi. \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} dx &= R \cos \psi \cos \chi d\psi - R \sin \psi \sin \chi d\chi, \\ dy &= R \cos \psi \sin \chi d\psi + R \sin \psi \cos \chi d\chi, \\ dz &= -R \sin \psi d\psi. \end{aligned} \quad (29)$$

Враховуючи, що $\dot{\epsilon}_x = \frac{\dot{x}}{L}$, $\dot{\epsilon}_y = \frac{\dot{y}}{L}$, $\dot{\epsilon}_z = \frac{\dot{z}}{L}$ отримуємо:

$$\begin{aligned} 2\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_y - \dot{\epsilon}_z &= \frac{1}{L} (2R \dot{\psi} \cos \psi \cos \chi - 2R \dot{\chi} \sin \psi \sin \chi - \\ &\quad - R \dot{\psi} \cos \psi \sin \chi - R \dot{\chi} \sin \psi \cos \chi + R \dot{\psi} \sin \psi), \\ 2\dot{\epsilon}_y - \dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_z &= \frac{1}{L} (2R \dot{\psi} \cos \psi \sin \chi + 2R \dot{\chi} \sin \psi \cos \chi - \\ &\quad - R \dot{\psi} \cos \psi \cos \chi + R \dot{\chi} \sin \psi \sin \chi + R \dot{\psi} \sin \psi), \\ 2\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_y - \dot{\epsilon}_x &= \frac{1}{L} (2R \dot{\psi} \sin \psi - R \dot{\psi} \cos \psi \cos \chi + R \dot{\chi} \sin \psi \sin \chi - \\ &\quad - R \dot{\psi} \cos \psi \sin \chi + R \dot{\chi} \sin \psi \cos \chi), \\ \dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z &= \frac{1}{L} (R \dot{\psi} \cos \psi \cos \chi - R \dot{\chi} \sin \psi \sin \chi + \\ &\quad + R \dot{\psi} \cos \psi \sin \chi + R \dot{\chi} \sin \psi \cos \chi - R \dot{\psi} \sin \psi). \end{aligned} \quad (30)$$

Підставляючи (29) і (30) в (24)–(26) отримуємо проекції сили опору на вісі Ox , Oy , Oz . Однак представлені інтеграли важко вирішувати аналітичним способом. Тому скористаємося програмним пакетом Mathematica і визначимо залежності проекцій сили опору від кутів атаки α і нахилу γ робочого органу дискатора в діапазоні від (0 рад) до 30° ($\pi/6$ рад), швидкості його переміщення V (1–4 м/с) та глибини обробітку ґрунту h (0,03–0,12 м). Апроксимуючі отримані дані отримано рівняння регресії для трьох проекцій сили опору:

$$F_x = 5627,99 V (-0,00324251 + h^2 + 0,0194825 \alpha^2 + \alpha (0,00757036 + 0,00345249 \gamma) + h (0,391995 + 0,188717 \alpha + 0,0317635 \gamma) + 0,00251167 \gamma - 0,00051995 \gamma^2) (\cos \alpha + \sin \alpha (0,307692 \cos \gamma + 0,307692 \sin \gamma)); \quad (31)$$

$$F_y = 1731,69 V (-0,00324251 + h^2 + 0,0194825 \alpha^2 + \alpha (0,00757036 + 0,00345249 \gamma) + h (0,391995 + 0,188717 \alpha + 0,0317635 \gamma) + 0,00251167 \gamma - 0,00051995 \gamma^2) (\cos \alpha + \sin \alpha (3,25 \cos \gamma + \sin \gamma)); \quad (32)$$

$$F_z = 1731,69 V (-0,00324251 + h^2 + 0,0194825 \alpha^2 + \alpha (0,00757036 + 0,00345249 \gamma) + h (0,391995 + 0,188717 \alpha + 0,0317635 \gamma) + 0,00251167 \gamma - 0,00051995 \gamma^2) (\cos \alpha + \sin \alpha (\cos \gamma + 3,25 \sin \gamma)). \quad (33)$$

Графічна інтерпретація залежностей (31)–(33) представлена на рис. 5 – 6.

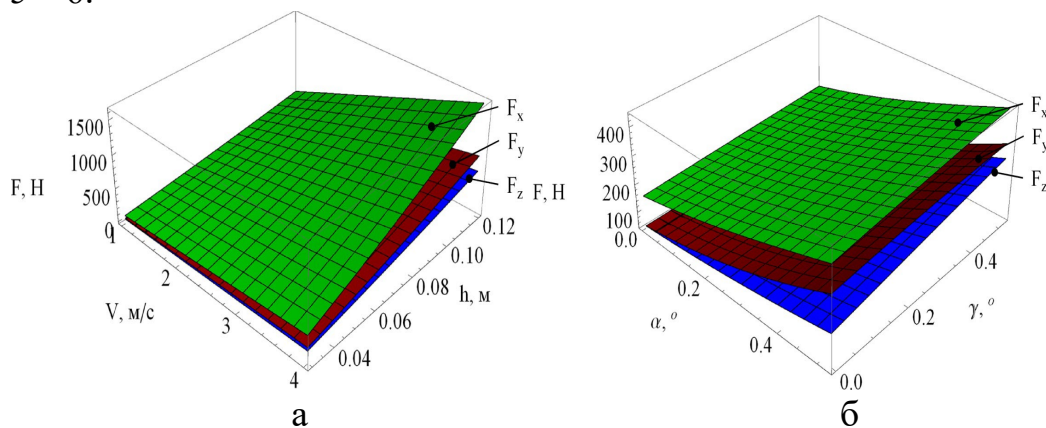


Рисунок 5. Залежності проекцій сили опору: а - від швидкості переміщення робочого органу дискатора V та глибини обробітку ґрунту h при $\alpha = 15^\circ$, $\gamma = 10^\circ$; б - від кутів атаки α і нахилу γ робочого органу дискатора при $V = 3$ м/с, $h = 0,03$ м

Висновки. Таким чином, в результаті теоретичних досліджень переміщення частинки ґрунту по увігнутій сферичній поверхні дискового робочого органу із урахуванням сил, що виникають при його



взаємодії з ґрунтовим середовищем побудовано математичну модель для визначення площі та рівняння лінії контакту ґрунту з сферичною поверхнею диска в залежності від його конструктивних параметрів (радіус сферичної поверхні R , діаметр диска d), кутів атаки α і нахилу γ та глибини обробітку ґрунту h .

Враховуючи отримані залежності площі та рівняння лінії контакту ґрунтового середовища із поверхнею робочого органу дискатора та використовуючи відомі аналітичні закономірності для компонентів нормальних напружень пружно-в'язко-пластичного ґрунтового середовища, одержано залежності для визначення проекцій сили опору від кутів атаки α і нахилу γ робочого органу дискового знаряддя, швидкості його переміщення V та глибини h обробітку ґрунту.

Список використаних джерел

1. Гуков Я. С. Обробіток ґрунту. Технологія і техніка. Механіко-технологічне обґрунтування енергозберігаючих засобів для механізації обробітку ґрунту в умовах України [Текст]: наукове видання / Я. С. Гуков. К.: ДІА, 2007. 276 с.
2. Godwin R. J. A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces. *Soil and Tillage Research*. 2007. Vol. 97. P. 331–340.
3. Elvis López Bravo. Simulation of Soil and Tillage-tool Interaction by the Discrete Element Method. Catholic University of Leuven Faculty of Bioscience Engineering. 2013. 130 p.
4. Шевченко І. А. Керування агрофізичним станом ґрунтового середовища. К.: Видавничий дім “Вініченко”, 2016. 320 с.
5. Бакум М. В., Ящук Д. А. Проектування ґрунтообробних машин з дисковими робочими органами. Навчальний посібник. Харків: ХНТУСГ, 2011. 34 с.
6. Гуцол О. П., Ковбаса В. П. Обґрунтування параметрів і режимів руху ґрунтообробних машин з дисковими робочими органами: Монографія. Київ, 2016. 145 с.
7. Ковбаса В. П., Войтюк Д. Г., Короткевич П. С., Мартишко В. М. Ковбаса В. П. Моделювання процесу взаємодії робочих органів сільськогосподарських машин з ґрунтом. *Науковий вісник НАУ*. Київ. 1997. Вип.2. С. 117–123.
8. Кушнарев С. А., Погорельый В. В., Чуб С. А. Кинематика точек сферических дисков почвообрабатывающих орудий при взаимодействии с почвой. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка*. Вип.75. Т.1. Харків, 2008. С.121–127.
9. Yun Zhang. 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. 2016. 219 p.

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

Стаття надійшла до редакції 05.04.2023 р.

O. Kozachenko, K. Sedykh, O. Volkovskiy
State Biotechnological University

THEORETICAL ANALYSIS OF THE FORCE INTERACTION OF THE DISK WORKING BODY WITH THE SOIL ENVIRONMENT

Summary

The article highlights the results of theoretical studies of the interaction of the disc working body of the tillage tool with the soil environment. Based on the results of a critical analysis of known scientific works regarding the chosen direction of research, the expediency of further study of the process of interaction of disk working bodies with the soil environment, the influence of structural parameters and modes of operation in order to increase the agronomic and energy indicators of tillage tools has been established. In the process of implementing the set tasks, mathematical modeling of the movement of an elementary soil particle along the spherical surface of the disk working body of the tillage tool was performed in order to determine the line and area of contact of the soil medium with the surface of the disk, which is carried out taking into account the force of the soil slop, which is formed on the working spherical surface of the disk, Coriolis force and centrifugal force, which are caused by its rotational movement during the execution of the technological process, and in accordance with the selected design parameters, namely, the radius of the spherical surface R of the disk and its diameter d , the angle of attack α and the angle of inclination γ in the vertical plane and the depth h of soil cultivation. Using the developed program in the Mathematica software package, the soil tillage depth h was varied from 0.03 m to 0.12 m, the angle of attack α and the angle of inclination γ of the working body of the disc tool in the range from 0° (0 rad) to 30° ($\pi/6$ rad) and determined values of the contact area S of the processed soil medium with the disc working body. Using known analytical regularities regarding the normal stress components of the elastic-viscous-plastic soil environment and the Mathematica software package, the dependencies of the projections of the resistance force of the working body of the disc tool on the selected design parameters, the depth h of soil cultivation and the speed of movement were determined.

Key words: disk working body, soil environment, spherical disk, design parameters, angle of attack, angle of inclination.