

УДК 631.311.54

## ВЗАЄМОДІЯ СПІРАЛЬНОГО УЩІЛЬНЮВАЛЬНОГО РОБОЧОГО ОРГАНУ З ГРУНТОМ

О.В. Папченко, наук. співр., Б.П. Польовий, ст. наук. співр.  
ННЦ "ІМЕСГ"

*Розглянуто взаємодію ґрунтообробного дослідного ущільнювального робочого органу спірального типу з ґрунтом при передпосівному обробітку ґрунту.*

*Ключові слова:* ущільнювальний робочий орган, спіраль, частинка ґрунту, коток.

**Постановка проблеми.** Дослідження кінематичних параметрів і форм робочої поверхні, які впливають на якісні і енергетичні показники роботи ґрунтообробних машин, не втрачає актуальності на сучасному етапі розвитку таких технічних засобів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У публікаціях[1,3] наведені результати теоретичних досліджень гвинтових спіральних робочих органів при взаємодії їх з ґрунтом. У цій статті пропонується розгляд взаємодії частинки ґрунту з спіральним ущільнювальним робочим органом котка, для визначення його кутової швидкості.

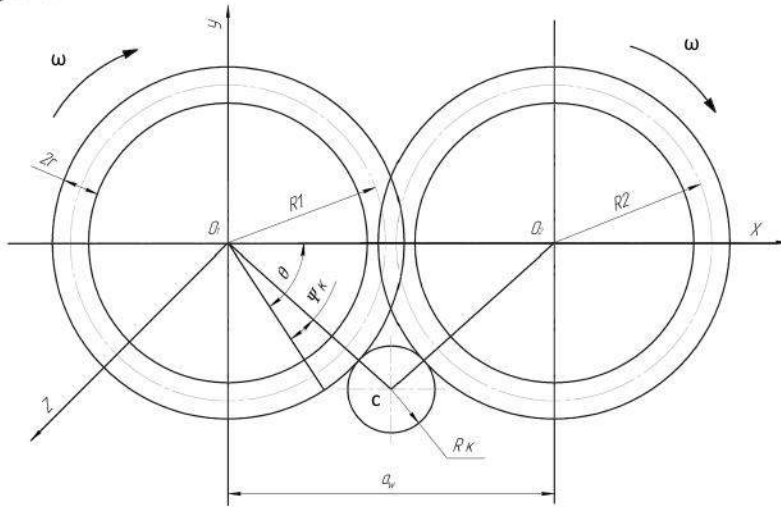
**Постановка завдання.** Мета дослідження полягає в підвищенні якості роботи ущільнювальних робочих органів, зменшенні матеріаломісткості та енерговитрат.

**Результати досліджень.** Рух частинок ґрунту по поверхні спірального ущільнювального робочого органу відбувається за двома варіантами:

- а) частинки ґрунту знаходяться між спіралями котків;
- б) частинки ґрунту знаходяться на поверхні під спіраллю.

Частинки ґрунту радіусом  $R_k$  знаходяться на поверхні спірального робочого органу, виконаного у вигляді спіралі радіусом  $R$  і кроком навивки  $S$  та кутом підйому кутової лінії  $\gamma$ . Припустимо, що частинки ґрунту розміщені в один шар і між собою дотикаються по більшому діаметру. Спіралі встановлені послідовно одна в другу для кращого самоочищення і кращого подрібнення грудок, з міжцентровою відстан-

ню  $a_w$ . Обертання спіралей навколо власних осей відбувається в тому напрямку, в якому виготовлені спіралі, ліві або праві. Вибрано систему координат  $xo, yz$  (рис.1), вісь якої направлена вздовж лінії центрів спіралей з початком у точці  $O_p$ , а вісь  $O_p z$  вздовж лінії, яка паралельна осям спіралі. В даному випадку вісь  $O_p z$  направлена вздовж осі першої спіралі.



**Рис. 1.** Схема розміщення частинки ґрунту між спіралями котка

В цій системі координат параметричні рівняння кожної поверхні спірального котка, який обертається, для будь-якого моменту часу мають такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} X_i &= X_{oi} + R_i \cos(\psi_{oi} + \psi_i) \\ Y_i &= Y_{oi} + R_i \sin(\psi_{oi} + \psi_i) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$Z_i = Z_{oi} \pm \frac{S_i \Psi_i}{2\pi}$$

де  $X_{oi}, Y_{oi}, Z_{oi}$  – координати центрів  $i$ -го спірального котка. В нашому випадку  $X_{o1} = Y_{o1} = Z_{o1} = 0$ ;  $X_{o2} = a_w$ ;  $Y_{o2} = Z_{o2} = 0$ ;  $\psi_i$  – початкове значення незалежних кутових параметрів  $i$ -го спірального котка, тобто  $t=0$ .

Знак третього рівняння системи (1) визначає напрямки навивки спіралі, якщо спіраль має праву навивку, то знак „плюс”; ліву – „мінус”.

Отже рівняння гвинтових ліній, утворених осями витків, мають та-

кий вигляд:

$$\begin{aligned} X_1 &= R_1 \cos(\psi_{01} + \psi_1) \\ Y_1 &= R_1 \sin(\psi_{01} + \psi_1) \end{aligned} \quad \text{Для першої спіралі}$$

$$Z_1 = -\frac{S_1 \cdot \phi_1}{2\pi}$$

$$X_2 = a_w + R_2 \cos(\psi_{02} + \psi_2)$$

$$Y_2 = R_2 \sin(\psi_{02} + \psi_2) \quad \text{Для другої спіралі}$$

$$Z_2 = -\frac{S_2 \cdot \psi_2}{2\pi}$$

Формалізований опис поверхні спіральних елементів спрощується при використанні спеціальної гвинтової системи координат  $o\rho\phi\psi$ , в якій розміщення довільної точки визначається параметрами  $\rho$ ,  $\phi$  та  $\psi$ , (де  $\rho$  та  $\phi$  – відповідно радіальний та кутовий - параметри полярної системи координат у площині поперечного перерізу і  $\psi$  – кутовий параметр, що задає розміщення поперечного перерізу по довжині спірального котка).

Початкове розміщення осі  $o\rho'$ , від положення якої визначається кут  $\psi$ , вибирають за напрямком головної нормалі  $\vec{n}^c$  гвинтової лінії.

Введемо додаткову декартову систему координат  $o'x'y'z'$ . Тоді напрямком осі  $o'x'$  буде співпадати з напрямком вектора головної нормалі  $\vec{n}$ , вісь  $o'y'$  – по напрямку дотичної  $\tau$  до гвинтової осі спіралі, а вісь  $o'z'$  – по бінормалі  $\vec{b}$ . Координати довільної точки поперечного перерізу, що визначались параметрами  $\rho$ ,  $\phi$  та  $\psi$  в системі  $o'x'y'z'$  визначаються такими залежностями:

$$x' = \rho \cos \phi; \quad y' = 0; \quad z' = \rho \sin \phi$$

Значення проєкцій радіального параметра на осі основної системи координат  $хоуz$  будуть дорівнювати:

$$\rho_x = \rho \sin \phi \cdot \sin \gamma \cdot \sin \psi; \quad \rho_y = \rho \sin \phi \sin \gamma \cos \phi; \quad \rho_z = \rho \sin \phi \cos \gamma$$

В основній системі координат  $хоуz$  система 1 за умови, якщо частинка ґрунту буде знаходитися на поперечній осі, матиме такий вигляд:

$$X = (R + \rho \cos \phi) \cos \psi + \rho \sin \phi \sin \gamma \sin \phi$$

$$Y = (R + \rho \cos \phi) \sin \psi - \rho \sin \phi \sin \gamma \cos \psi$$

$$Z = \frac{S\psi}{2\pi} + \rho \cos \gamma \sin \phi$$

Для спіралі, яка обертається з кутовою швидкістю навколо нерухо-  
мої поздовжньої осі, система рівнянь має вигляд:

$$\begin{aligned} X_i &= (R + \rho_i \cos \varphi_i) \cos (\psi_0 + \omega t) + \rho_i \sin \varphi_i \sin \gamma \sin (\psi_0 + \omega t) \\ Y_i &= (R + \rho_i \cos \varphi_i) \sin (\psi_0 + \omega t) - \rho_i \sin \varphi_i \sin \gamma \cos (\psi_0 + \omega t), \quad (2) \\ Z_i &= \frac{S\omega t}{2\pi} + \rho_i \cos \gamma \sin \varphi_i \end{aligned}$$

Отже, отримана система рівнянь (2) описує рух довільної точки по  
поверхні однієї спіралі, що обертається навколо власної осі. Дані рів-  
няння і подальші їх перетворення дають змогу отримати кінематичні  
параметри, які будуть характеризувати рух частинок ґрунту, на які діє  
спіральний ущільнювальний робочий орган.

Розглянемо систему (2) для визначення кінематичних характерис-  
тик у випадку дії спіралі на частинку ґрунту. Оскільки в даному ви-  
падку

$$P = R_q + \frac{d_n}{2},$$

де  $R_q$  – радіус частинки ґрунту;  $d_n$  – діаметр прутка навивки спіралі,  
то із третього рівняння системи (2) можна визначити поперечну коор-  
динату  $Z$ , яка буде враховувати положення частинок ґрунту на поверх-  
ні спірального котка:

$$Z_i = \frac{S}{2\pi} (\theta_i - \omega t) + (R_q + \frac{d_n}{2}) \cos \gamma \cdot \sin \theta$$

Тоді вираз для визначення основної швидкості руху частинок ґрун-  
ту матиме вигляд:

$$\frac{dz_i}{dt} = \frac{S}{2\pi} (\frac{d\theta_i}{dt} - \omega) + (R_q + \frac{d_n}{2}) \cos \gamma \cdot \cos \theta_i \frac{d\theta_i}{dt}, \quad (3)$$

Крім того розміщення частинок ґрунту під спіральним котком може  
визначатися деяким кутовим параметром  $\theta$ . Його початкове значення  
відповідає куту між лінією центрів  $O_1O_2$  і прямою  $O_1C$ , що з'єднує  
центр першої спіралі з центром ваги частинки ґрунту. При відомій  
лінійній координаті  $z$  частинки ґрунту її кутове розміщення визнача-  
ється за залежністю

$$\theta = 2\pi z / S + \pi$$

Точки контакту  $E_1, E_2$  з частинкою матимуть кутові параметри відповідно  $\theta_1, \theta_2$ , які дорівнюють:  $\theta_1 = \theta_0 + \psi$ ;  $\theta_2 = \theta - \psi$ ;

Для визначення початкового значення  $\theta_0$  розглянемо трикутник  $O_1CO_2$  (рис. 1). Згідно теореми косинусів, допишемо вираз, за допомогою якого можна визначити кут  $\theta_0$ ,

$$\cos \theta_0 = \frac{\left[ R_1 + \left( \frac{d_{n1}}{2} + R_k \right) \cos \phi \right]^2 + a_w^2 - \left( R_2 + \frac{d_{n1}}{2} + R_k \right)^2}{\frac{2a_w}{\cos \psi} \left[ R_1 + \left( \frac{d_{n1}}{2} + R_v \right) \cos \phi \right] \cos^2 \phi}$$

Визначимо вплив на кутові координати в спеціальній гвинтовій системі координат деяких геометричних параметрів. Для цього прирівняємо друге рівняння системи (2) до нуля. Звідки:

$$(R + \rho \cos \phi) \cos \psi = \left( R_v + \frac{d_n}{2} \right) \sin \gamma - \cos \phi \sin \psi$$

Після певних перетворень випливає:

$$tq \psi = \frac{Rtq^2 \gamma (\pi - \psi)}{R + \frac{1}{\cos \gamma} \sqrt{\rho^2 \cos^2 \gamma - R^2 (\pi - \psi)^2}}, \quad (4)$$

Кут  $\psi$  залежить від геометричних параметрів спіралі і буде змінюватись залежно від радіального параметра  $\rho$ , радіуса спіралі  $R$  і параметра навивки  $\gamma$ .

Тоді кутові параметри точок контакту та центра частинок ґрунту в полярній системі координат будуть дорівнювати:

$$\varphi_{1,2} = \pm \arcsin \frac{S (\pi - \psi_k)}{2\pi \rho_c \cos \gamma}, \quad (5)$$

Виділяємо на спіралі дугу  $\delta l$ , яка відповідає куту  $\psi$  на проектуючій площині. Проекція  $I_i$  на площину поперечного перерізу дорівнює  $\delta l \cos \gamma$ . З іншого боку проекцію дуги на площину можна також виразити як  $\psi R$ . Тоді  $\delta l \cos \gamma = \psi R$ . Для малих значень кутів справедлива рівність  $\psi = \sin \psi$ , тому з останнього співвідношення знаходимо синус кутового параметра

$$\sin \psi = \frac{\delta l \cdot \cos \gamma}{R}, \quad (6)$$

Розглядаючи нахил навивки, нескладно прийти до висновку, що  $d_l = S \sin \gamma$ , тоді:

$$\sin \psi = \frac{S \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma}{R} = \frac{S \cdot \sin \cdot 2\gamma}{2R}, \quad (7)$$

Для попередніх формул, виходячи з геометричного розгляду, слід зауважити, що

$$\sin \phi = \frac{S}{d_n + 2R_k}; \quad \cos \phi = \frac{\sqrt{d_n^2 + 4d_n R_k + 4R_k^2 - S^2}}{d_n + 2R_k}, \quad (8)$$

Загальні питання руху частинок ґрунту по поверхні спірального котка досить детально розглянуті в працях відомого вченого в галузі землеробської механіки академіка П.М.Василенка [2], методичне використання яких з уточненням для певних умов дають можливість отримати математичну модель руху частинки ґрунту по поверхні спірального котка.

При попередніх розрахунках руху частинки ґрунту по поверхні спірального котка, які дають можливість описати взаємодію частинок ґрунту з робочою поверхнею, розглянемо відносний рух одиначної частинки (рис. 2). Під поверхнею спіральної навивки радіусом  $R$  і кутом підйому кутової лінії  $\gamma$  знаходиться частинка з середнім радіусом  $R_2$ . Допустимо, що початкова швидкість частинки, тобто швидкість частинки ґрунту при попаданні на поверхню спірального котка, буде дорівнювати нулю. При цьому на частинку будуть діяти наступні сили:  $G = mg$  – сила тяжіння частинки масою  $m$ , яка разом з рухомою системою координат обертається із кутовою швидкістю  $\omega$ ;

$\bar{N}$  – сила нормальної реакції поверхні спіральної навивки, яка направлена по нормалі до траєкторії відносного руху частинки ґрунту по спіралі;  $F = fN$  сила тертя ковзання по поверхні спіральної навивки, яка направлена проти напрямку відносного руху тіла. Де  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання частинки по матеріалу спіральної навивки. Для частинок ґрунту можна прийняти (за умови металевої спіральної поверхні)  $f = 0,2 \dots 0,3$ ;  $P_n^e$  – відцентрова сила інерції, що направлена по нормалі до траєкторії руху, величина якої дорівнює

$$\bar{P}_n^e = \omega^2 P m,$$

де  $P$  – радіальний параметр положення центра ваги тіла відносно осі спіралі.

$\bar{P}_n^k$  – коріолісова сила енерції, яка направлена по нормалі до тра-

екторії відносного руху проти напрямку коріолісового прискорення, величина якої дорівнює:

$$P_n^k = 2m\omega \sin(\omega \wedge V);$$

де  $P_v$  - сила підпору частинок ґрунту;  $\bar{M}_r$  - момент сили тертя кочення, який визначається за формулою:

$$M_r = \delta \cdot N$$

$\delta = R_4 \cdot tq \mu$  - коефіцієнт тертя кочення;  $\mu$  - кут тертя кочення.

ω

**Рис. 2.** Схема руху частинки ґрунту під спіральним котком

Загальний вигляд векторного рівняння руху частинки ґрунту по поверхні спіралі матиме вигляд:

$$m\bar{W} = \bar{G} + \bar{N} + \bar{F} + \bar{P}_n^e + \bar{P}_u^k + \bar{P}_v, \quad (9)$$

де  $\bar{W}$  - прискорення руху центра частинки ґрунту по поверхні спірального котка.

Найбільший вплив на кутову швидкість частинки має зміна кроку навивки.

З проведених перетворень випливає, що мінімальне значення кутової швидкості обертального руху спіралі визначатимуся за залежністю:

$$\omega_{\min} = \left( 1 + \frac{2\pi \left( R_v + \frac{d_n}{2} \right)}{s} \cdot \cos\gamma \cdot \omega \cdot \theta \right) \cdot \dot{\theta}, \quad (10)$$

**Висновки.** Встановлено, що при взаємодії ґрунту і ущільнювального робочого органу спірального типу котка складова сил змінюється по вертикальній та горизонтальній площинах, а на його обертання найбільший вплив мають діаметр прутка та крок спіралі.

### БІБЛІОГРАФІЯ

1. Гевко Б.М., Рогатинський Р.М. Винтовые подающие механизмы сельскохозяйственных машин. Львів: Вища школа. Вид-во при ЛСГІ, 1989, 175 с.
2. Василенко П.М. Введение в земледельческую механику. – К: Сільгоспосвіта, 1996, –234 с.
3. Рогатинський Р.М. Механіко-технологічні основи взаємодії шнекових робочих органів з сировиною сільського господарства // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук, К., 1997. – 33 с.

### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СПИРАЛЬНОГО УПЛОТНЯЮЩЕГО РАБОЧЕГО ОРГАНА С ПОЧВОЙ

*Изложено определение минимальной угловой скорости вращательного движения спирали уплотняющего рабочего органа для предпосевной обработки почвы.*

**Ключевые слова:** уплотняющий рабочий орган, спираль, частица почвы, каток.

### SUBSTANTIATION OF OPERATING MODES OF SPIRAL PACKING WORKING MEMBER

*The evaluation of the minimal angular speed of rotation of the spiral of a packing working member for pre-sowing tillage is given.*

**Key words:** packing working member, spiral, soil particle, roller.