

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ВИКОПУВАЛЬНОГО РОБОЧОГО ОРГАНУ З ГРУНТОМ

А. Кушнар'ов, д-р. техн. наук, проф., чл.-кор. НААН України
Л. Шустік, канд. техн. наук, **С. Маринін**
УкрНДПВПТ ім. Л. Погорілого

У статті наведено теоретичні дослідження долотоподібного робочого органу для викопування цибулі ріпчастої

Ключові слова: *долотоподібний робочий орган, ядро ущільнення, цибуля ріпчаста*

Суть проблеми. Одним з основних напрямів підвищення якості збирання врожаю цибулі ріпчастої є пошук і конструювання робочих органів для одночасного викопування і сепарації цибулі від ґрунту і забезпечення передумов її подальшого механізованого збирання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням розробленням робочого органу долотоподібного типу присвячені роботи багатьох авторів. Фундаментальні дослідження проведені такими великими вченими, як В.П. Горячкін і П.М. Василенко [1, 2, 3]. Надалі дослідження в цьому напрямку були розвинені в роботах Г.Н. Синеокова, І.М. Панова, В.Ф. Пашенко, В.І. Ветохіна [4, 5, 6, 7, 8].

Вперше долотоподібний робочий орган був застосований для викопування цибулі ріпчастої [9]

Мета дослідження – теоретично обґрунтувати процес взаємодії долотоподібного робочого органу з ґрунтом.

Виклад основного матеріалу досліджень.

Якісне виконання технологічного процесу (отримання необхідної частини грудок ґрунту менше або на рівні мінімального діаметра товарної цибулі), що тісно корелює з величиною кута кришення ґрунту β , є похідна таких чинників, як форма клину, яка впливає на величину активного кута ядра ущільнення, режими роботи (глибина ходу клину h , швидкість руху клину v) і тип ґрунту. Враховуючи постійність або невеликий розкид більшості з названих чинників (глибини ходу клину $h=4$ см, швидкості руху клину $v=6-7$ км/год), в умовах роботи робочого органу машини для викопування цибулі ріпчастої базовим параметром є кут α .

Під час руху в ґрунті викопувального робочого органу долотоподібного типу перед ним утворюється ґрунтове ущільнене ядро з частинками, що періодично змінюються, у вигляді клину, яке й впливає на оброблюване середовище. Висота майданчика викопувального робочого органу має

відносно невеликий розмір (до 20 мм), і тому можна вважати, що ядро ущільнення має прямолінійну поверхню з висотою підйому ґрунту, рівною його ширині. Вибираємо декартову рухому систему координат XOZ з початком відліку в початку ядра ущільнення (рис. 1).

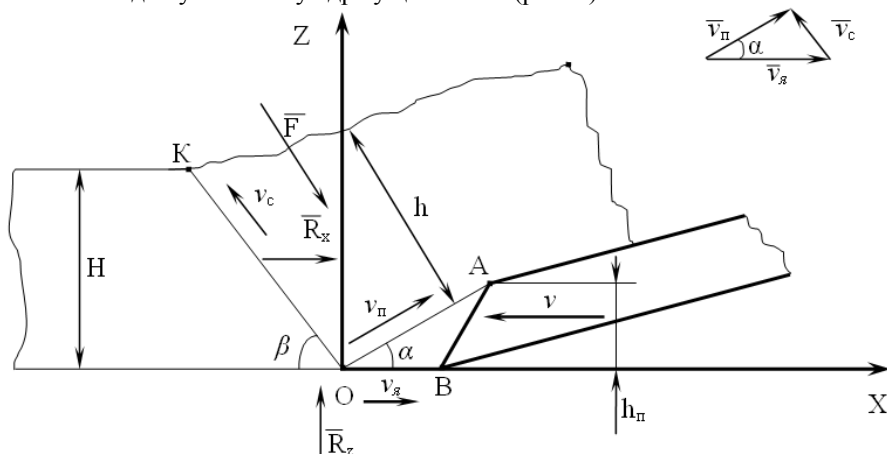


Рисунок 1 – Деформація ґрунту під впливом клину

Ядро ущільнення АОВ, що переміщується з швидкістю $v_{я}$, вдавлюється в частину ґрунту, що не деформується. Це призводить до зниження швидкості руху пласта ґрунту щодо клину і підвищення його рівня. Виходячи з умов безперервності руху ґрунту, отримуємо:

$$h = H \frac{v}{v_{я}}, \quad (1)$$

де H – глибина ходу клину;

h – товщина вивантаженого шару ґрунту перед клином;

v – швидкість руху клину в ґрунті;

$v_{я}$ – швидкість руху ядра ущільнення;

$v_{с}$ – швидкість руху пласта ґрунту щодо лінії зрушення ОК;

$v_{п}$ – швидкість руху пласта ґрунту щодо клину.

Тіло зрушення під дією ядра ущільнення переміщується по його поверхні з швидкістю $v_{п}$ і одночасно ковзає по площині зрушення зі швидкістю $v_{с}$ [1]. З трикутника швидкостей, використовуючи теорему синусів, знаходимо:

$$v_{п} = v_{я} \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}; \quad v_{с} = v_{я} \frac{\sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}. \quad (2)$$

На утворене в сипкому середовищі тіло ковзання впливають горизонтальна R_x і вертикальна R_z складові рівнодіючої дії клину на ґрунт, викликані силами тертя і пасивним тиском ґрунту на клин, а також сила інерції пласта ґрунту F .

На підставі теорії граничного стану сипкого середовища знаходимо [7].

$$R_x = h_{\Pi} \frac{1 - \sin \varphi_B \cos 2\alpha}{1 - \sin \varphi} (1 + ctg \alpha tg \varphi) \cdot \left[\frac{\gamma H}{2} + C_{\omega} ctg \varphi_B \left(1 - \frac{1 - \sin \varphi}{1 - \sin \varphi_B \cos 2\alpha} \right) \right]; \quad (3)$$

$$R_z = h_{\Pi} \frac{1 - \sin \varphi_B \cos 2\alpha}{1 - \sin \varphi} (1 + ctg \alpha tg \varphi) \cdot \left[\frac{\gamma H}{2} + C_{\omega} ctg \varphi_B \left(1 - \frac{1 - \sin \varphi}{1 - \sin \varphi_B \cos 2\alpha} \right) \right]. \quad (4)$$

де γ - щільність ґрунту;

φ - кут тертя ґрунт-клин;

φ_B - кут внутрішнього тертя ґрунт-ґрунт.

Наведені формули справедливі лише для визначення зусиль, необхідних для утворення тіла ковзання [5].

Для спрощення подальших викладень введемо такі позначення:

$$D_1 = \frac{1 - \sin \varphi_B \cos 2\alpha}{1 - \sin \varphi} h_{\Pi}; \quad (5)$$

$$D_2 = C_{\omega} ctg \varphi_B \left(1 - \frac{1 - \sin \varphi}{1 - \sin \varphi_B \cos 2\alpha} \right). \quad (6)$$

Тоді отримаємо:

$$R_x = D_1 \left(\frac{\gamma H v_{\gamma}}{2v_{\gamma}} + D_2 \right) (1 + ctg \alpha tg \varphi); \quad (7)$$

$$R_z = D_1 \left(\frac{\gamma H v_{\kappa}}{2v_{\gamma}} + D_2 \right) (ctg \alpha + tg \varphi). \quad (8)$$

Динамічний тиск пласта, викликаний його інерцією, можна розглядати як безперервний удар частинок об площину клину, використовуючи рівняння руху Мещерського зі змінною масою [4].

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \vec{F}. \quad (9)$$

Оскільки значення початкової швидкості частинок ґрунту у напрямі абсолютної швидкості до зіткнення з клином постійне, то рівняння (9) можна записати у вигляді

$$\vec{F} = \frac{dt}{dm} \vec{v}_{\Pi}. \quad (10)$$

Масу ґрунту $\frac{dm}{dt}$ одиничної ширини, що надходить на клин в одиницю часу, обчислюють за формулою

$$\frac{dm}{dt} = \frac{h\gamma}{g} v_{я}.$$

Тоді, з урахуванням рівнянь (1) і (2), маємо:

$$F = \frac{H\gamma v}{g} \frac{\sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} v_{я}. \quad (11)$$

Ввівши позначення

$$D_3 = \frac{H\gamma v}{g} \frac{\sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}, \quad (12)$$

отримаємо:

$$F = D_3 v_{я}. \quad (13)$$

Рівняння динаміки руху пласта ґрунту на поверхні клину в прийнятій системі

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = R_x + F \cos \beta; \quad (14)$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = R_z - F \sin \beta. \quad (15)$$

З урахуванням рівнянь (7), (8) і (13) отримаємо

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = D_1 \left(\frac{\gamma H v}{2 v_{я}} + D_2 \right) (1 + \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{tg} \varphi) + D_3 v_{я} \cos \beta;$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = D_1 \left(\frac{\gamma H v}{2 v_{я}} + D_2 \right) (\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{tg} \varphi) - D_3 v_{я} \sin \beta.$$

Позначивши

$$D_4 = (\gamma H v / 2 m) D_1; \quad (16)$$

$$D_5 = (1 + \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{tg} \varphi) D_1 / m; \quad (17)$$

$$D_6 = (\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{tg} \varphi) D_1 / m; \quad (18)$$

$$D_7 = (\cos \beta / m) D_3; \quad (19)$$

$$D_8 = (\sin \beta / m) D_3, \quad (20)$$

після проведення необхідних перетворень отримаємо таку систему диференціальних рівнянь:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} - \frac{D_4 D_5}{v_{я}} - D_7 v_{я} - D_2 D_5 = 0; \quad (21)$$

$$\frac{d^2 z}{dt^2} - \frac{D_4 D_6}{v_{\text{Я}}} + D_8 v_{\text{Я}} - D_2 D_6 = 0. \quad (22)$$

Розв'яжемо диференціальні рівняння:

Введемо заміну змінних в рівнянні: $\frac{dx}{dt} = u$; $\frac{d^2 x}{dt^2} = \dot{u}$.

Тоді

$$\dot{u}u - D_7 u^2 - D_2 D_5 u - D_4 D_5 = 0$$

або

$$u \frac{du}{dt} = D_7 u^2 + D_2 D_5 u + D_4 D_5$$

Після розділення змінних отримаємо

$$\frac{udu}{D_7 u^2 + D_2 D_5 u + D_4 D_5} = dt.$$

Проінтегруємо ліву частину рівняння

$$\frac{1}{23_7} \int \frac{d(D_7 u^2 + D_2 D_5 u + D_4 D_5)}{D_7 u^2 + D_2 D_5 u + D_4 D_5} - \frac{D_2 D_5}{2D_7^2} \int \frac{du}{\left(u \frac{D_2 D_5}{2D_7}\right) + \frac{D_4 D_5}{D_7} - \frac{(D_2 D_5)^2}{4D_7^2}}.$$

Вирішивши диференціальне рівняння за умови, що

$$\frac{D_4 D_5}{D_7} - \frac{(D_2 D_5)^2}{4D_7^2} > 0$$

отримаємо

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha}{D_7} \left[\ln \left| \frac{D_8 v_{\text{Я}}^2 + D_2 D_6 v_{\text{Я}} + D_4 D_6}{\operatorname{tg} \alpha} \right| - \ln \left| \frac{D_4 D_5}{\operatorname{tg} \alpha} \right| \right] - \frac{D_2 D_5}{D_7 \sqrt{\frac{D_4 D_5}{D_7} - \frac{(D_2 D_5)^2}{4D_7^2}}} \times \quad (23)$$

$$\times \left[\ln \left| \frac{v_{\text{Я}} + \frac{D_2 D_5}{2D_7} - \sqrt{\frac{(D_2 D_5)^2}{4D_7^2} - \frac{D_4 D_5}{D_7}}}{v_{\text{Я}} + \frac{D_2 D_5}{2D_7} + \sqrt{\frac{(D_2 D_5)^2}{4D_7^2} - \frac{D_4 D_5}{D_7}}} \right| - \ln \left| \frac{\frac{D_2 D_5}{2D_7} - \sqrt{\frac{(D_2 D_5)^2}{4D_7^2} - \frac{D_4 D_5}{D_7}}}{\frac{D_2 D_5}{2D_7} + \sqrt{\frac{(D_2 D_5)^2}{4D_7^2} - \frac{D_4 D_5}{D_7}}} \right| \right] - t = 0.$$

Якщо $\frac{D_4 D_5}{D_7} - \frac{(D_2 D_5)^2}{4D_7^2} > 0$, то рівняння (23) з урахуванням заміни

змінних запишеться так:

$$\frac{1}{D_7} \ln |D_7 v_{я}^2 + D_2 D_5 v_{я} + D_4 D_5| - \frac{D_2 D_5}{D_7 \sqrt{\frac{D_4 D_5}{D_7} - \frac{(D_2 D_5)^2}{4 D_7^2}}} \cdot \operatorname{arctg} \frac{v_{я} + \frac{D_2 D_5}{2 D_7}}{\sqrt{\frac{D_4 D_5}{D_7} - \frac{(D_2 D_5)^2}{4 D_7^2}}} = t + C.$$

Виходячи з початкових умов $t = 0$; $v_{я} = 0$, отримаємо значення постійної інтеграції

$$C = \frac{1}{D_7} \ln |D_4 D_5| - \frac{D_2 D_5}{D_7 \sqrt{\frac{D_4 D_5}{D_7} - \frac{(D_2 D_5)^2}{4 D_7^2}}} \cdot \operatorname{arctg} \frac{\frac{D_2 D_5}{2 D_7}}{\sqrt{\frac{D_4 D_5}{D_7} - \frac{(D_2 D_5)^2}{4 D_7^2}}}$$

У такому разі вирішення диференціального рівняння (21) матиме вигляд:

$$\frac{1}{D_7} \ln |D_7 v_{я}^2 + D_2 D_5 v_{я} + D_4 D_5| - \ln |D_4 D_5| - \frac{D_2 D_5}{D_7 \sqrt{\frac{D_4 D_5}{D_7} - \frac{(D_2 D_5)^2}{4 D_7^2}}} \times$$

$$\times \left[\operatorname{arctg} \frac{v_{я} + \frac{D_2 D_5}{2 D_7}}{\sqrt{\frac{D_4 D_5}{D_7} - \frac{(D_2 D_5)^2}{4 D_7^2}}} - \operatorname{arctg} \frac{\frac{D_2 D_5}{2 D_7}}{\sqrt{\frac{D_4 D_5}{D_7} - \frac{(D_2 D_5)^2}{4 D_7^2}}} \right] - t = 0.$$

Якщо $\frac{D_4 D_5}{D_7} - \frac{(D_2 D_5)^2}{4 D_7^2} < 0$, то рішення диференціального рівняння (21)

набуває вигляду:

$$\frac{1}{D_7} \ln |D_7 v_{я}^2 + D_2 D_5 v_{я} + D_4 D_5| - \ln |D_4 D_5| - \frac{D_2 D_5}{2 D_7 \sqrt{\frac{(D_2 D_5)^2}{4 D_7^2} - \frac{D_4 D_5}{D_7}}} \times$$

$$\times \left[\ln \left| \frac{v_{я} + \frac{D_2 D_5}{2 D_7} - \sqrt{\frac{(D_2 D_5)^2}{4 D_7^2} - \frac{D_4 D_5}{D_7}}}{v_{я} + \frac{D_2 D_5}{2 D_7} + \sqrt{\frac{(D_2 D_5)^2}{4 D_7^2} - \frac{D_4 D_5}{D_7}}} \right| - \ln \left| \frac{\frac{D_2 D_5}{2 D_7} - \sqrt{\frac{(D_2 D_5)^2}{4 D_7^2} - \frac{D_4 D_5}{D_7}}}{\frac{D_2 D_5}{2 D_7} + \sqrt{\frac{(D_2 D_5)^2}{4 D_7^2} - \frac{D_4 D_5}{D_7}}} \right| \right] - t = 0.$$

З урахуванням того, що $z = xt g \alpha$; $\frac{d^2 z}{(dt)^2} = \frac{d^2 x}{(dt)^2} t g \alpha$; $\frac{dx}{dt} = u$ рівняння

(22) запишемо у вигляді

$$iu - \frac{D_8}{\operatorname{tg} \alpha} u^2 - \frac{D_2 D_6}{\operatorname{tg} \alpha} u - \frac{D_4 D_6}{\operatorname{tg} \alpha} = 0.$$

Якщо $\frac{D_4 D_5}{D_7} - \frac{(D_2 D_5)^2}{4D_7^2} < 0$, то рішення диференціального рівняння (22)

матиме вигляд

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha}{D_8} \left[\ln \left| \frac{D_8 v_{\text{я}}^2 + D_2 D_6 v_{\text{я}} + D_4 D_6}{\operatorname{tg} \alpha} \right| - \ln \left| \frac{D_4 D_5}{\operatorname{tg} \alpha} \right| \right] - \frac{D_2 D_5}{2D_7 \sqrt{\frac{(D_2 D_5)^2}{4D_7^2} - \frac{D_4 D_5}{D_7}}} \times$$

$$\times \left[\ln \left| \frac{v_{\text{я}} + \frac{D_2 D_5}{2D_7} - \sqrt{\frac{(D_2 D_5)^2}{4D_7^2} - \frac{D_4 D_5}{D_7}}}{v_{\text{я}} + \frac{D_2 D_5}{2D_7} + \sqrt{\frac{(D_2 D_5)^2}{4D_7^2} - \frac{D_4 D_5}{D_7}}} \right| - \ln \left| \frac{\frac{D_2 D_5}{2D_7} - \sqrt{\frac{(D_2 D_5)^2}{4D_7^2} - \frac{D_4 D_5}{D_7}}}{\frac{D_2 D_5}{2D_7} + \sqrt{\frac{(D_2 D_5)^2}{4D_7^2} - \frac{D_4 D_5}{D_7}}} \right| \right] - t = 0. \quad (24)$$

Час проходження пласта ґрунту клином з урахуванням рівняння (2) обчислюємо за формулою

$$t = \frac{h_{\text{п}}}{\sin(\alpha + \beta) v_{\text{я}}}. \quad (25)$$

Масу ґрунту, що впливає на площину ядра ущільнення і робочий орган, знаходимо з геометричних міркувань на підставі відомих величин кутів зрушення і обсіпання за формулою

$$m = \frac{\gamma H v}{v_{\text{я}}} \left\{ \frac{h_{\text{п}}}{\sin \alpha} + \frac{H v [\operatorname{ctg}(\alpha + \beta)] - \operatorname{ctg}(\alpha + \varphi_{\text{в}})}{2v_{\text{я}}} \right\}, \quad (26)$$

де кут зрушення $\beta = 90^\circ - \frac{\alpha + \varphi + \varphi_{\text{в}}}{2}$.

Висновки

Після вирішення системи рівнянь було знайдено значення кута β кришення ґрунту долотом і відносна швидкість руху пласта ґрунту по ядру ущільнення. Набуте значення кута кришення ґрунту співпадає з його експериментальним значенням, що підтверджує достатню адекватність моделі реальним умовам для його використання в проведенні досліджень за визначенням параметрів долотоподібного викопувального робочого органу.

Представлена модель дає можливість визначити кут β кришення ґрунту, відносну швидкість руху пласта ґрунту, а також час знаходження пласта на клині.

Література

1. Горячкин В.П. Общая теория орудий: Собр. соч. / В.П. Горячкин. – Т. 1. – М.: Колос, 1965.
2. Горячкин В.П. Теория разрушения почв: Собр. соч. / В.П. Горячкин. – Т. 2. – М.: Колос, 1965.
3. Василенко П.М. Теория движения частиц по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин / П.М. Василенко. – К.: Изд-во УАСХН – 1960. – 284 с.
4. Синеоков Г.Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г.Н. Синеоков, И.М. Панов. – М.: Машиностроение, 1977. – 328 с.
5. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами / А.Н.Зеленин. – изд-е 2-е. – М.: Машиностроение, 1968.– 375 с.
6. Панов И.М. Физические основы механики почв / И.М. Панов, В.И.Ветохин. – К.: Феникс, 2008. –266 с.
7. Пащенко В.Ф. Механико-технологические средства эколого-экономического совершенствования процессов обработки почвы: дис. ... док. техн. наук: 05.05.11 / В.Ф. Пащенко. – Харьков, 2005. – 335 с.
8. Ветохин В.И. Системні та фізико-механічні основи проектування розпушувачів ґрунту: автореф. дис. док. техн. наук: спец. 05.05.11 «Машини та засоби механізації в сільськогосподарському виробництві». / В.И. Ветохин. – Глеваха, 2010. – 43 с.
9. Пат. 59912 Україна, МПК А 01 В 77/00. Викопуючий робочий орган для цибулі / В.І. Кравчук, С.П. Маринін, А.С. Кушнар'юв, Л.П.Шустік, Л.І. Мазурик (Україна). - № u201011767; заявл. 04.10.2010; опубл. 10.06.2011, Бюл. №11. – С. 4.

Анотація

В статтю приведено теоретичні дослідження долотообразного робочого органа для выкапывания лука репчатого

Summary

The article presents theoretical research on chisel-like working element for digging up bulb onion.