

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМОДІЇ РОТАЦІЙНОГО РОБОЧОГО ОРГАНУ З ГРУНТОМ

Беловол С.А., аспірант

*Харківський національний технічний університет
сільського господарства імені Петра Василенка*

Розроблена математична модель взаємодії ротаційного органу вдосконаленої конструкції з ґрунтом, для забезпечення оптимальної структури кореневмісного шару при обробі міжрядь просапних культур.

Постановка питання. Завданням міжрядної обробки є зміна структурних властивостей кореневмісного шару ґрунту до стану, що відповідає нормальним умовам розвитку культурних рослин. Механізована міжрядна обробка передбачає рихлення і перемішування ґрунту кореневмісного шару та вирівнювання обробленої поверхні поля. Рихлення змінює відстань між фракціями ґрунту, що підвищує водо- і повітропроникність, біологічну активність та накопичення поживних речовин доступних для рослин, яке відбувається внаслідок розкладання органічних речовин. Крім цього, рихлення забезпечує знищення ґрунтової кірки, яка затримує розвиток культурних рослин та посилює втрату вологи. Рихлення створює умови більш глибокого проникнення коренів культурних рослин у ґрунт, що забезпечує доступ до вологи, яка знаходиться у нижніх шарах [1].

Процес рихлення ґрунту зводиться до утворення ґрунтообробними робочими органами стружки із параметрами, що визначаються ґрунтово-кліматичними умовами та біологічними особливостями вирощуваних культур.

Використання ротаційних знарядь привідної дії дозволяє регулювати параметри утворюваної ґрунтової стружки в широких межах, що забезпечує якісний обробіток за різних умов його виконання. При цьому, застосування ротаційних органів з вертикальною віссю обертання забезпечує якісне видалення бур'янів, утворення мульчуючого шару на поверхні ґрунту без виносу його нижніх шарів, чим зберігається продуктивна волога у кореневмісному шарі. Для визначення та обґрунтування оптимальних параметрів ротаційного органу необхідно розробити математичну модель утворення ґрунтової стружки під його дією.

Аналіз останніх досліджень. Процес утворення ґрунтової стружки представляє собою відділення певного шару ґрунту від моноліту з наступним його подрібненням. Вивчення цього явища є однією із основоположних складових землеробської механіки. Питання деформації ґрунту під дією двогранного клина були досліджені акад. В.П. Горячкіним. Ці дослідження були розвинуті в працях Г.Н. Синеокова та І.М. Панова. Відомі сучасні наукові пошуки проф. В.І. Ветохіна по створенню системної моделі кришення пласта ґрунту. Крім того, були відомі результати досліджень П.Т. Бабія, де приведені

положення щодо визначення об'єму скиби ґрунту що відрізається під дією фрези з вертикальною віссю обертання. Проте, така модель не враховує ґрунтово-кліматичні умови, агротехнічні вимоги до міжрядного обробітку та включає емпіричні показники, що робить неможливим її використання у практичній діяльності при проектуванні нових ґрунтообробних знарядь [2, 3, 4, 5].

Таким чином, сьогодні існує ґрунтова теоретична база для вирішення прикладних задач при вдосконаленні ґрунтообробних знарядь, але невідома математична модель, яка б дозволяла враховувати умови та агротехнічні вимоги до міжрядного обробітку ротаційними органами з вертикальною віссю обертання.

Метою досліджень є розробка математичної моделі утворення ґрунтової стружки під дією ротаційного органу вдосконаленої конструкції шляхом вивчення процесу його взаємодії з робочим середовищем.

Результати досліджень. Переміщуючись у вертикальній площині кожен робочий елемент (зуб) ротаційного орану відділяє ґрунтову стружку з визначеними параметрами, які визначаються траєкторіями руху двох сусідніх робочих елементів (зубів), що розміщені по колу. Ступінь рихлення ґрунту визначається кількістю зубів та кінематичним режимом роботи ротаційного органу. При цьому, значення наведених конструктивно-технологічних параметрів обмежені через конструктивну недоцільність та підвищення енергоємності. Тому, вдосконалена конструкція передбачає застосування двох дисків (зовнішнього та внутрішнього із розміщеними по колу робочими елементами), що встановлені на одній вісі та обертаються у зустрічних напрямках [6]. Це дозволяє підвищити якість обробки без збільшення габаритів та енергомосткості машини.

Очевидно, що рух зубів ротаційного органу в процесі роботи відбувається з деяким ковзанням, яке залежить від його розміщення в робочій (оброблюваній) зоні. Відповідно до агротехнічних вимог – на межі захисної (необроблюваної) зони пошкодження культурних рослин повинне бути мінімальним. Це означає, що швидкість ковзання на межі робочої та захисної зони, що співпадає з направляючою циклоїдою, по якій рухаються зуби, повинна бути мінімальною. Швидкість ковзання на межі робочої та захисної зони визначається як:

$$V_{\kappa} = V_n + V_{\text{кол}}$$
$$\text{При } V_{\kappa} = 0 \quad |V_n| = |R\omega| \quad (1)$$

де V_n – поступальна швидкість ротаційного органу, м/с;

$V_{\text{кол}}$ – колова швидкість ротаційного органу, м/с.

Це співвідношення забезпечує мінімальну деформацію ґрунту в захисній зоні, і як наслідок, упередження пошкодження кореневої системи культурних рослин.

Таким чином, в подальшому будемо враховувати, що поступальна швидкість агрегату повинна бути рівною окружній швидкості обертання робочого органу (по модулю).

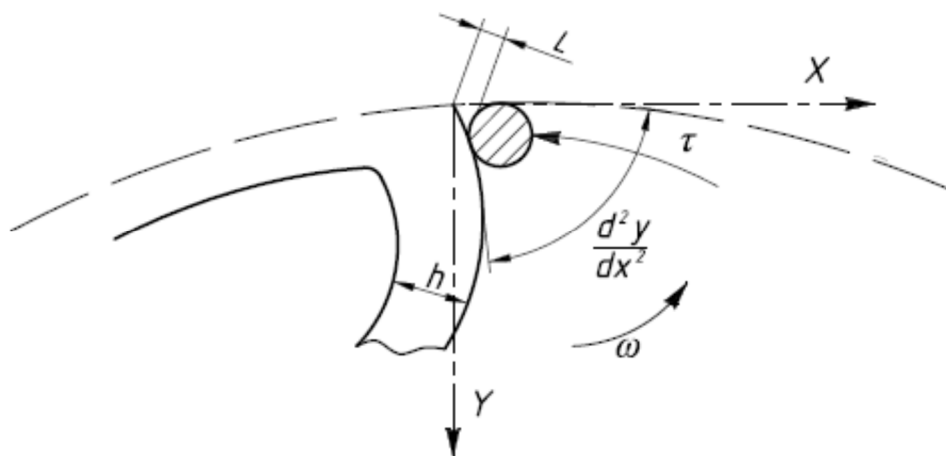


Рис. 1 – Схема утворення стружки ґрунту робочим елементом ротаційного органу

З урахуванням цієї обставини кінематична схема машини повинна виглядати таким чином (рис. 1), тобто враховувати рівняння (1).

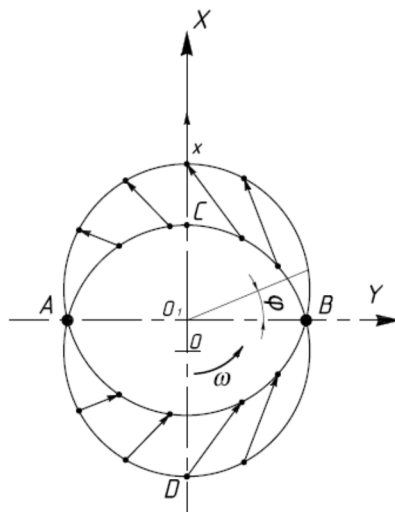


Рис. 2 – Годограф моторів швидкостей ротаційного органу

Вважаючи край захисної зони (направляючу циклоїди) нерухомою центроїдою, розглянемо розміщення векторів швидкостей різних точок диска робочого органу (моторів швидкостей), зображених в деякому масштабі по умові (1) на рис. 2. Видно, що всі швидкості направлені в бік руху. Виключення складає точка *A* де миттєва швидкість дорівнює нулю (рис. 2). Годограф моторів швидкостей також описує деяке коло, зміщене вперед на величину поступальної швидкості. Таким чином, моторі швидкостей нахилені до ліній руху під кутом $\frac{\varphi}{2}$ в бік обертання.

Ділянка ACB виконує руйнівну функцію, тобто відриває від необробленого ґрунту визначену частину шляхом фрезерування, утворюючи так звану стружку з наступною обробкою.

Розглянемо процес утворення стружки на прикладі роботи одного зуба (рис. 1). Будемо вважати, що зуб має круговий перетин. Під тиском дотичного зусилля перед зубом утворюється випереджуюча тріщина, яка забезпечить руйнування моноліту ґрунту. Будемо вважати ділянку ґрунту пружним тілом. Тоді, скористаємося положеннями теорії пружності [7]:

$$L = \frac{2\alpha E}{\pi(1-\sigma)p_0^2} \quad (2)$$

де L – довжина тріщини;
 E – модуль пружності;
 σ – коефіцієнт Пуассона;
 α – коефіцієнт поверхневого натягу;
 p_0 – розтягуючі напруження.

Розрахуємо коефіцієнт Пуассона [7]:

$$\sigma = \frac{1}{2} \cdot \frac{3k - 2\mu}{3k + 2\mu} \quad (3)$$

де k – модуль всебічного стискання;
 μ – модуль зсуву.

В нашому випадку $k = 108 \text{ МПа}$, $\mu = 12,2 \text{ МПа}$. Тоді, згідно із (3) отримаємо коефіцієнт Пуассона $\sigma = 0,45$. Із довідкової літератури відомо, що коефіцієнт поверхневого натягу α при вологості 10...13% складає $\alpha = 10,9 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$, а розтягуючі напруження p_0 дорівнює $p_0 = 12 \text{ кПа} = 12 \cdot 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

Після підстановки вихідних даних в (2) отримаємо: $L = 1,8 \text{ мм}$

Відмітимо, що випереджуюча тріщина сприяє руйнуванню суцільного масиву ґрунту.

Визначимо тепер товщину стружки, яка відривається від моноліту необробленого ґрунту, від якого відривається шар товщиною h , прикладений до нього зовнішній шар діє проти сил поверхневого натягу на поверхні відриву (рис. 1). При заданій зовнішній силі встановлюється рівноважна відриву і формою стружки, що відділяється під дією зуба. Виведемо формулу, яка пов'язує величину поверхневого натягу з формою стружки і її товщиною.

Вигинаючий момент, що діє по лінії відриву стружки визначається згідно рівняння:

$$M = \frac{Eh^3}{12(1-\sigma^2)} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (4)$$

Робота вигинаючої сили є малою величиною другого порядку. Умова рівноваги полягає в рівності цієї роботи зміні поверхневої енергії, тобто $2\alpha\delta x$, де α – коефіцієнт поверхневого натягу, а множник 2 враховує виникнення двох поверхонь при розриві. Таким чином, отримуємо:

$$\alpha = \frac{Eh^3}{24(1-\sigma^2)} \cdot \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) \quad (5)$$

звідки будемо мати:

$$h^3 = \frac{24(1-\sigma^2)}{E \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right)^2} \quad (6)$$

Розрахуємо для (6) похідну $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$. Відомо, відриваючий зуб здійснює рух по циклоїді, рівняння якої в параметричній формі має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} x &= r(\varphi - \sin \varphi); \\ y &= r(1 - \cos \varphi). \end{aligned} \quad (7)$$

де r – радіус утворюючого круга (в нашому випадку радіус зовнішнього диску);
 φ – кут повороту, який відраховується від направляючої в бік руху.

Розрахуємо відповідні похідні (по φ) та використаємо методи диференційної геометрії, тоді рівняння (6) прийме вигляд:

$$h^3 = \frac{24\alpha(1-\sigma^2)r^2(1-\cos)^4}{E} \quad (8)$$

З рівняння (8) видно, що товщина стружки змінюється від нуля ($\varphi = 0$) до $1,8\text{ см}$ ($\varphi = \frac{\pi}{2}$) і знову до нуля при $\varphi = \pi$ (по співвідношенню $(1 - \cos \varphi)^4$).

Побудуємо графоаналітичні залежності товщини стружки від кута повороту точки ротора на різних типах ґрунту.

З аналізу рисунку 3 видно, що товщина стружки буде найбільшою при

обробці глинистих ґрунтів що пояснюється високою зв'язністю їх агрегатів і відповідно найменшою на піщаних ґрунтах.

Таким чином, у лобовій частині робочого органу утворюється грудки ґрунту з максимальним діаметром до 1,8 см, якщо рахувати товщину стружки діаметром її частин, що розламуються. При подальшому закручуванні і перемішуванні внутрішнім диском робочого органу порушуються зв'язки кореневої системи бур'янів, і вони виносяться із товщини ґрунту вгору вздовж лінії ковзання (по гелікоїду).

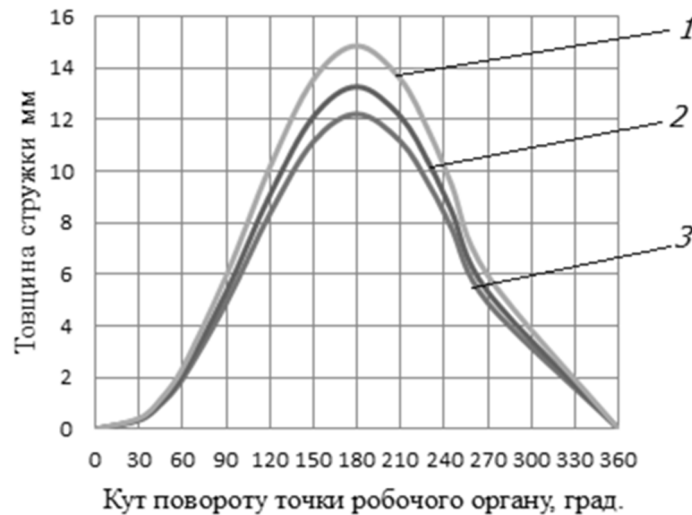


Рис. 3 – Залежність товщини стружки, що утворюється при роботі ротаційного органу від кута його повороту на різних типах ґрунту: 1 – глина; 2 – суглинок; 3 – пісок.

Стружка утворена при обертанні робочого органу в процесі обертання і поступального руху потрапляє в зону обертання внутрішнього диску. В результаті вона відривається від моноліту і закручується, внаслідок чого і відбувається її руйнування.

Розглянемо цей процес детальніше. Відомо, що при закручуванні блок ґрунту складається із пружного блоку і пластичного блоку. Пластична частина блоку руйнується легко, а пружна залишається достатньо цілою і складає основну частину грудочок фракційного складу ґрунту. Зробимо розрахунок розмірів цієї фракції.

Стружка до руйнування має наступні розміри: раніше визначену товщину h ; ширину $b = R_1 - R_2$ (різниця радіусів зовнішнього та внутрішнього дисків); довжину l , що дорівнює глибині занурення робочого елемента (зуба).

Розрахуємо кут закручування стружки. Як пластини розмірами: $h = 1,8\text{ см}$; $b = 6,3\text{ см}$; $l = 6\text{ см}$.

Розв'язок цієї задачі елементарними засобами неможливе, внаслідок того, що методи теорії пружності дозволяють отримати розв'язок у вигляді нескінченних рядів. Тому, скористаємося відомими емпіричними співвідношеннями.

Крутильна жорсткість пластини прямокутного перерізу [7]:

$$c = abh^3 \quad (9)$$

Тоді, питомий кут закручування θ (на одиницю довжини):

$$\theta = \frac{M}{c_1 G} \quad (10)$$

де: M – крутний момент;
 G – модуль зсуву.

Коефіцієнт α візьмемо із [7]. Після підстановки відповідних значень кут закручування при визначеній глибині обробці ґрунту: $\theta = 0,63 \text{ рад} = 36^\circ$. Тоді, отримаємо розмір пружного ядра (грудочки), який складає 4 мм ($d = 8 \text{ мм}$). Слід відмітити. Що це найбільш крупна фракція. Більш дрібні утворюються в частинах першої зони при $\varphi \approx 0$ та $\varphi \approx \pi$.

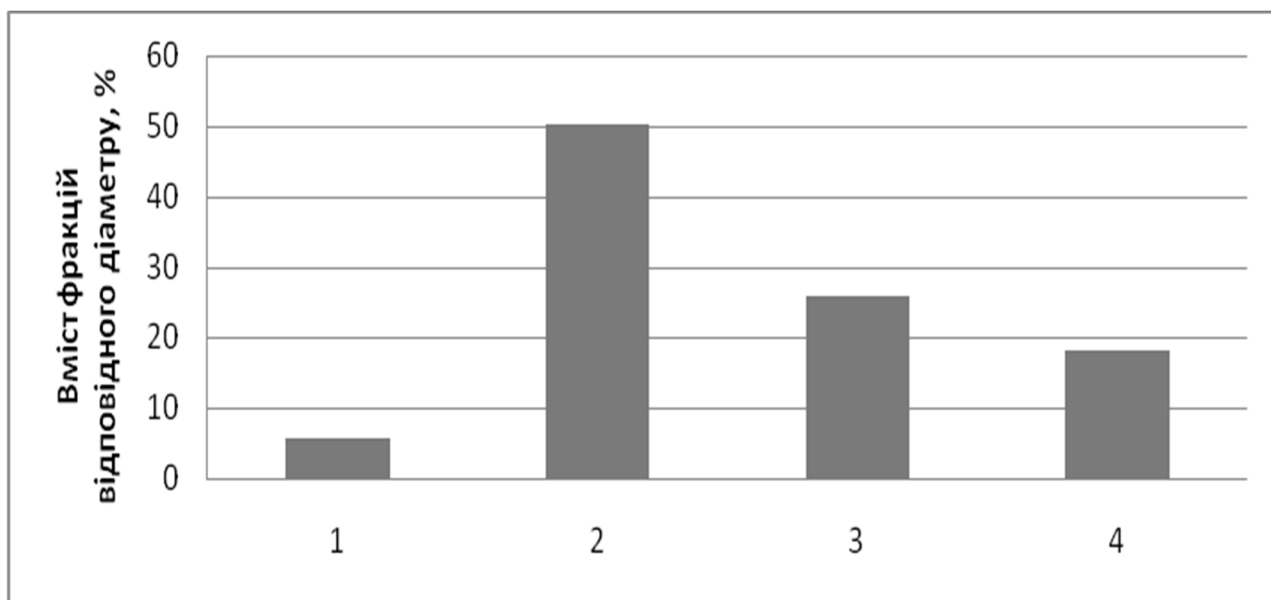


Рис. 4 – Результати аналізу фракційного складу ґрунту після обробки ротаційним органом:

1 – вміст фракцій діаметром до 1,0 мм; 2 – вміст фракцій діаметром 1,0...5,0 мм; вміст фракцій діаметром – 5,0...10 мм; 4 – вміст фракцій діаметром понад 10,0 мм.

Для перевірки правильності математичної моделі були проведені експериментальні дослідження в польових умовах, методика проведення яких була розроблена згідно положень СОУ 74.3-37-127:2004 «Машини і знаряддя для обробітку просапних культур. Методи випробувань» та СОУ 74.3-37-155:2004 «Машини та знаряддя для обробітку ґрунту. Методи випробувань». В розрізі досліджуваного питання був визначений фракційний склад ґрунту. Перед обробіткою міжрядь дослідною установкою з ротаційними органами вдосконаленої конструкції визначались умови випробувань згідно ГОСТ 20915 «Сільськогосподарська техніка. Методи визначення умов випробування», які були наступними: ґрунту і його назва за агрегатним складом – чорнозем глибокий середньосуглинистиймалогумусний; вологість ґрунту по шарах на

глибину обробки складала: 0...2 см – 18,0 %; 2...4 см – 18,1%; 4...6 см – 19,3%; 6...8 см – 19,7%; твердість ґрунту по глибині становила: 0...5 см – 0,76 МПа; 5...10 см – 1,51 МПа. Відбирались проби ґрунту у міжрядді на глибину обробки через 1,5 години з облікової ділянки площею 0,25м² у чотириразовій повторності. Відібрані проби просівались через набір решіт, які розташовують у порядку зменшення діаметру отворів. Вміст кожного решета зважувався, з похибкою ±20 г. Результати вимірів та розрахунків масової частки фракцій відповідного діаметру заносились у відомість, для візуалізації вони представлені на рис 4.

Таким чином, вміст найбільш цінної з точки зору агротехнічних вимог фракції діаметром від 1...10 мм склала 76,38%, що підтверджує результати теоретичних досліджень та задовольняє умовам якості обробітку.

Висновки. Згідно поставленої мети виконано наступне:

1. Розроблено математичну модель утворення ґрунтової стружки під дією ротаційного органу, що враховує умови та агротехнічні вимоги міжрядногообробітку.

2. Визначна залежність товщини стружки, що відділяється робочим елементом ротаційного органу від моноліту від кута повороту та типу ґрунту, що обробляється.

3. Теоретично розрахований максимальний діаметр фракцій ґрунту після відділення та подальшого подрібнення стружки ротаційним органом.

4. Проведена експериментальна перевірка адекватності математичної моделі.

Результати теоретичних експериментальних досліджень підтверджують ефективність застосування ротаційного органу вдосконаленої конструкції, яка забезпечує оптимальну структуру кореневмісного шару ґрунту.

Список використаних джерел

1. Кушнар'ов А.С. Механико-технологические основы обработки почвы / А.С. Кушнар'ов, В.И. Кочев. – К. : Урожай, 1989. – 138 с.
2. Горячкин В.П. Собрание сочинений. Том первый / В.П. Горячкин. – М. : Колос, 1965. – 714 с.
3. Синеоков Г.Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Синеоков Г.Н., Панов И.М. – М. : Машиностроение, 1977. – 328 с.
4. Ветохин В.И. Систематизация свойств и характеристик почвы как элемент теории проектирования рыхлителей [Электронный ресурс] / В.И. Ветохин // Новейшие технико-технологич. решения возделывания почвы и посева основных сельскохозяйств. культур: Матер. интернет-конф. в рамках V международ. форума ИНТЕРАГРО-2009. – Киев: УкрНИИПИТим. Л. Погорелого- Мин. агрополитики Украины. - 2009. – Режим доступа: <http://www.ndipvt.org.ua/konf2/2/16.htm>.
5. Бабій, П.Т. Визначення параметрів фрези з вертикальною віссю обертання / Республіканський міжвідомчий тематичний науково-технічний збірник. Механізація і електрифікація сільського господарства. Випуск 12

- «Механізація робіт у садівництві». К.: «Урожай», 1969, С 3– 11.
6. Ротаційний робочий орган культиватора [Текст] : пат. 97072 Україна, МПК⁶ А 01 В 35/16, А01В 39/08, А01В 39/18, А01В 21/06, А01В 33/06. / Пастухов В. І., Браженко С. А.; заявник і патентовласник Пастухов В. І., Браженко С. А. – № а201104043 ; заявл. 04.04.2011 ; опубл. 26.12.2011, бюл. №24.
7. Демидов, С.П. Теория упругости / С.П. Демидов. Учебник для вузов: Высшая школа, 1979. – 432 с.

Аннотация

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВАИМОДЕЙСТВИЯ РОТАЦИОННОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА С ПОЧВОЙ

Беловол С.

Разработана математическая модель взаимодействия ротационного органа усовершенствованной конструкции с почвой, для обеспечения оптимальной структуры корнеобитаемого слоя при обработке междурядий пропашных культур.

Abstract

MATHEMATICAL MODEL OF THE ROTARY WORKING BODY WITH SOIL

S. Bielovol

The mathematical model of the formation of soil chip under the action of rotary working body improved design for optimum root layer structure for inter-row cultivation has been developed.