

ОСОБЛИВОСТІ МЕХАНІКИ ПОДРІБНЕННЯ ГРУНТОВОГО ШАРУ ПРИ ОБРОБЦІ ЙОГО ЗУБЧАСТИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ

Мета роботи. Чорноземи України є однією з найбільших коштовностей держави та її стратегічним ресурсом. Якість та родючість ґрунтів значною мірою залежать від способу обробки та від конструктивних особливостей оброблювального інструменту. З метою інтенсифікації процесу, підвищення якості, зниження енергозатрат при обробці ґрунту запропоновано конструкцію зубчастого робочого органу (ЗРО). Поставлено задачу випробувати працездатність нового ЗРО, дослідити механіку подрібнення ґрунту при обробці його зубчастим робочим органом та розробити моделі взаємодії ґрунту з поверхнями зубців робочого органу.

Методи дослідження. Розроблено математичні моделі механіки подрібнення ґрунту при його обробці зубчастим робочим органом. Процес подрібнення складається з двох послідовних фаз. У першій фазі шар ґрунту руйнується при проходженні лобної поверхні інструмента, яка виконана по логарифмічній спіралі. Руйнування ґрунтового пласта в першій фазу залежить від швидкості руху машини та від характерного кута логарифмічної спіралі, по якій виконана лобова поверхня ЗРО. Далі шар подрібнюється на хвилястій поверхні синусного циліндра. Після подрібнення на лобовій поверхні ЗРО ґрунт потрапляє на хвилясту поверхню вже значно розпушеним. При цьому пласт отримує деформації перегину на синусній поверхні, що додатково і більш якісно руйнує цілісність і подрібнює пласт ґрунту за рахунок почергових деформацій розтягування (розриву) та стиску, викликаних впадинами та виступами синусної поверхні ЗРО. Комбінація спіральної та синусної поверхні зубчастого робочого органу забезпечує високу якість та енергоефективність обробки ґрунту.

Наукова новизна. Враховуючи сучасні аграрні реалії та перспективи України, обробка ґрунту новим зубчастим інструментом із комбінованими робочими поверхнями у вигляді логарифмічної спіралі та синусного циліндра є часним, актуальним та новим напрямом в сільськогосподарській науці.

Практична цінність. Руйнування ґрунтового пласта при обробці його наявними робочими органами в основному відбувається внаслідок деформацій розриву із зсувом. При обробці пропонованим зубчастим робочим органом за рахунок копіювання складного профілю робочої поверхні ЗРО додатково в ґрунті виникають напруження стиску, розтягу та згину. Неоднорідне поле деформацій сприяє високій якості подрібнення пласта під час обробки ґрунту з мінімальними енергозатратами.

Ключові слова: обробка ґрунту, зубчастий робочий орган (ЗРО), логарифмічна спіраль, лобова поверхня, хвиляста поверхня, синусний циліндр.

Якість обробки ґрунту та енерговитрати при цьому значною мірою залежать від типу робочого органу. З метою інтенсифікації процесу, підвищення якості, зниження енергозатрат при обробці ґрунту запропоновано конструкцію зубчастого робочого органу (ЗРО), яка детально розглянута в роботі [1]. У запропонованому ЗРО лобова поверхня виконана за логарифмічною спіраллю, наступна поверхня – хвилястою. На кожній із зазначених поверхонь процеси подрібнення ґрунту при його різанні ЗРО різні.

Розглянемо першу фазу процесу – рух пласта ґрунту по лобовій поверхні ЗРО, яка виконана за логарифмічною спіраллю

$$r_i = r_0 \cdot e^{\alpha \cdot t g \varphi},$$

де α – поточний кут логарифмічної спіралі, рад;

φ – кут внутрішнього тертя ґрунту, рад.

Спіральна поверхня інструменту побудована з урахуванням фізико-механічних властивостей ґрунту і глибини його обробки.

Руйнування пласта робочим органом, відбувається при умові

$$N \geq [N_0],$$

де $[N_0]$ – гранична сила нормального тиску ґрунту на робочу поверхню інструменту, Н.

У місцях концентрації граничної нормальної реакції ґрунту утворюються тріщини, що відповідають деформації розриву.

Для визначення нормальної складової реакції ґрунту скористаємося схемою (рис. 1).

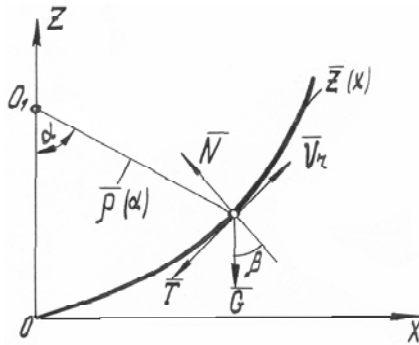


Рис. 1. Схема руху ґрунту по лобовій поверхні робочого органу

Рух елементів пласта ґрунту вгору по лобовій поверхні ЗРО можна моделювати як рух матеріальних точок по шорсткій поверхні [2]. Для визначення швидкості відносного руху ґрунту складемо рівняння рівноваги в природній системі координат, застосовуючи принцип Д'аламбера

$$\left. \begin{aligned} m \frac{dv_r}{dt} &= -T - G \sin(\alpha - \beta) \\ N &= G \cos(\alpha - \beta) + m \frac{v_r^2}{\rho(\alpha)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де m – маса ґрунту, яка знаходиться на лобовій поверхні та визначається через

- $m = \gamma \cdot V$, кг;
- V – об'єм ґрунту, m^3 ;
- γ – щільність ґрунту, $кг/м^3$;
- $T = fN$ – сила тертя ґрунту по інструменту, кН;
- f – коефіцієнт тертя ґрунту по сталі;
- $\rho(\alpha)$ – радіус кривизни робочої поверхні ЗРО, м;
- v_r – швидкість ковзання ґрунту по робочій поверхні, м/с.

Визначимо відносну швидкість руху пласта з рівняння (1)

$$m \frac{dv_r}{dt} = \left[mg \cos(\alpha - \beta) + \frac{mv_r^2}{\rho(\alpha)} \right] f - mg \sin(\alpha - \beta). \quad (2)$$

Замінивши $dt = \frac{\rho(\alpha)d\alpha}{v_r}$ та позначивши $v_r^2 = y$, отримаємо рівняння

$$\frac{dy}{d\alpha} + 2yf = 2g\rho(\alpha)[f \cos(\alpha - \beta) + \sin(\alpha - \beta)] \quad (3)$$

Інтегруємо рівняння з початковими умовами $\alpha = 0$ та $v_r = v$, де v – швидкість руху робочого органу, м/с.

Позначивши праву частину рівняння (3) через $\Phi(\alpha)$, отримаємо залежність

$$\frac{dy}{d\alpha} + 2yf = \Phi(\alpha), \quad (4)$$

Яка є лінійним неоднорідним рівнянням, що розраховується методом довільної сталої

$$y' + 2fy = 0; \quad y = ce^{2f\alpha},$$

де $c = c(\alpha)$ – довільна стала.

Подальші перетворення

$$y' = c'e^{-2f\alpha} - 2fce^{-2f\alpha}.$$

Дозволяють отримати зручне рівняння

$$\frac{dc}{d\alpha} \cdot e^{-2f\alpha} = 2g\rho(\alpha)[f \cos(\alpha - \beta) + \sin(\alpha - \beta)].$$

Звідки

$$c = 2g \int \rho(\alpha)e^{-2f\alpha}[f \cos(\alpha - \beta) + \sin(\alpha - \beta)]d\alpha, \quad (5)$$

де $\rho(\alpha) = a \cdot e^{k\alpha}$ – логарифмічна спіраль.

Після підстановки в рівняння (5) маємо

$$c = 2ga \left\{ f \frac{e^{k+2f}}{(k+2f)^2 + 1} \left[\cos(\alpha - \beta)(k+2f-1) + \sin(\alpha - \beta)\left(\frac{k}{f} + 3\right) \right] \right\} + c_1,$$

де $k = tg\varphi$ – коефіцієнт внутрішнього тертя ґрунту.

Враховуючи початкові умови $c(0) = v_m^2$, де v_m – швидкість машини, запишемо

$$v_m^2 = c_1 + 2ga \left\{ \frac{fe^{k+2f}}{(k+2f)^2 + 1} \left[\cos\beta(k+2f-1) - \sin\beta\left(\frac{k}{f} + 3\right) \right] \right\};$$

$$c_1 = v_m^2 + 2ga \left\{ \frac{fe^{k+2f}}{(k+2f)^2 + 1} \left[\left(\frac{k}{f} + 3\right) \sin\beta - (k+2f-1)\cos\beta \right] \right\}.$$

Далі

$$c(\alpha) = v_m^2 + 2ga \frac{fe^{k+2f}}{(k+2f)^2 + 1} \times \left[\left(\frac{k}{f} + 3\right) \sin\beta + \sin(\alpha - \beta) - (k+2f-1)\cos\beta - \cos(\alpha - \beta) \right].$$

Після перетворення маємо

$$y = v_r^2 = \left\{ \begin{aligned} & v_m^2 + 4ga \frac{fe^{k+2f}}{(k+2f)^2 + 1} \sin \frac{\alpha}{2} \times \\ & \times \left[\left(\frac{k}{f} + 3 \right) \cos \left(\beta - \frac{\alpha}{2} \right) + \right. \\ & \left. + (k+2f-1) \sin \left(\beta - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \end{aligned} \right\} e^{-2f\alpha}.$$

Ввівши позначення

$$4ga \frac{fe^{k+2f}}{(k+2f)^2 + 1} = A; \quad \frac{k}{f} + 3 = B;$$

$$(k+2f-1) = D,$$

остаточно отримаємо

$$v_r = e^{-f\alpha} \sqrt{V_m^2 + A \sin \frac{\alpha}{2} \left[B \cos \left(\beta - \frac{\alpha}{2} \right) + D \sin \left(\beta - \frac{\alpha}{2} \right) \right]}. \quad (6)$$

Рівняння (6) дозволяє провести аналіз залежності швидкостей ковзання ґрунту по лобовій поверхні ЗРО в різних її точках від швидкості руху машини (v_m) і кута (α), який визначає траєкторію руху пласта ґрунту за логарифмічною спіраллю.

Підставимо значення v_r в рівняння (1), з якого визначимо $N(\alpha)$. При цьому враховуємо, що G – є вага пласта, який знаходиться на робочому органі, і залежить від встановленої глибини обробки

$$N(\alpha) = mg \cos(\alpha - \beta) + \frac{me^{-f\alpha} \left(V_m^2 + A \sin \frac{\alpha}{2} \left[B \cos \left(\beta - \frac{\alpha}{2} \right) + D \sin \left(\beta - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \right)}{ae^{k\alpha}};$$

$$N(\alpha) = m \left\{ \frac{g \cos(\alpha - \beta) \cdot ae^{k\alpha} + e^{-f\alpha} \left(V_m^2 + A \sin \frac{\alpha}{2} \times \left[B \cos \left(\beta - \frac{\alpha}{2} \right) + D \sin \left(\beta - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \right)}{ae^{k\alpha}} \right\}. \quad (7)$$

Умову руйнування пласта, що пересувається по логарифмічній спіралі лобової поверхні ЗРО, можна виразити наступною залежністю

$$m \left\{ \frac{g \cos(\alpha - \beta) + e^{-f\alpha} \left(V_m^2 + A \sin \frac{\alpha}{2} \times \left[B \cos \left(\beta - \frac{\alpha}{2} \right) + D \sin \left(\beta - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \right)}{ae^{k\alpha}} \right\} \geq [N_g]. \quad (8)$$

Тобто руйнування ґрунтового пласта в першій фазі процесу повністю залежить від кута β , який характеризує логарифмічну спіраль лобової поверхні інструменту.

Розглянемо другу фазу процесу – рух пласта ґрунту по хвилястій поверхні ЗРО.

Після подрібнення ґрунту на лобовій поверхні ЗРО ґрунт потрапляє на хвилясту поверхню вже значно розпушеним. Тому рух зруйнованих елементів по даній поверхні можна вважати аналогічним руху частинок сипучої маси по поверхні синусного циліндра [3].

Для розгляду деформацій та руйнування ґрунту в другій фазі процесу скористаємось схемою (рис. 2).

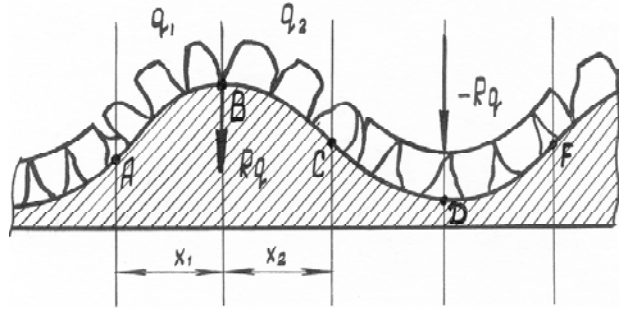


Рис. 2. Схема руху пласта ґрунту по хвилястій поверхні ЗРО

В точках A, C, F в результаті згину виникають напруження, що прагнуть зруйнувати пласт. Ці точки є місцями перегину пласта на синусній поверхні. Тут пласт ґрунту руйнується деформаціями згину. Перебуваючи на ділянці AC , пласт руйнується деформацією розриву. При цьому на ділянці AC діє нерівномірно розподілене навантаження q , інтенсивність якого змінюється вздовж ділянки AC в залежності від її довжини X . Інакше кажучи, q є функцією від X . Визначимо поперечну силу Q і момент M пласта ґрунту на ділянці AC .

Поперечна сила Q і згинальний момент M є також функціями від X .

Розглядаючи поперечну силу як суму елементарних сил $q(x)$, що прикладені до пласта на ділянках AB і BC , знаходимо

$$Q(x) = - \int_{x_1}^{x_2} q(x) dx. \quad (9)$$

Відповідно, $Q(x)$ дорівнює рівнодійній розподіленого навантаження.

На ділянці ВС сила в ґрунтовому пласті змінює свій знак на протилежний. Згинальні моменти на ділянках АВ і ВС рівні по величині, але протилежно спрямовані. Згинаючий момент можна обчислити як

$$M(\alpha) = \pm Rqx, \quad (10)$$

де R – радіус кривизни хвилястої поверхні, м.

На ділянці випуклої хвилі АС руйнування ґрунтового пласта відбувається деформацією розриву та зсуву за рахунок закономірних навантажень, що діють в цій зоні. На ділянці СF картина розподілення закономірних навантажень повторюється, тільки з тим винятком, що руйнування ґрунтового пласта тут відбувається деформацією стиснення.

Протягом хвилястої поверхні ЗРО пласт ґрунту під дією закономірних навантажень руйнується деформаціями розриву і стиснення, а також під дією згинального моменту.

Висновки

Руйнування ґрунтового пласта при обробці його наявними робочими органами в основному відбувається внаслідок деформацій розриву із зсувом.

При обробці пропонованим зубчастим робочим органом за рахунок копіювання складного профілю робочої поверхні ЗРО додатково в ґрунті виникають напруження стиску, розтягу та згину. Неоднорідне поле деформацій сприяє високій якості подрібнення пласта під час обробки ґрунту з мінімальними енергозатратами.

Список літератури

1. Кушнарєв А. С. Некоторые закономерности деформации почвы / Кушнарєв А. С., Бауков А. В // Почвообрабатывающие машины и динамика агрегатов : Труды / ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1970. – Вып. 33. – С. 44–49.
2. Василенко П. М. Теория движения частиц по шероховатым поверхностям с.х. машин / Василенко П. М. – К. : Изд-во УСХА, 1960. – С. 283–289.
3. Шалман Д. А. Снегоочистители / Шалман Д. А. – Л. : Машиностроение, 1973. – 235 с.

Одержано 15.09.2018

Шанина З.М., Марговицкий Л.М., Глушко В.И. Особенности механики измельчения почвенного слоя при обработке его зубчатым рабочим органом

Цель работы. Черноземы Украины являются одной из главных ценностей государства и его стратегическим ресурсом. Качество и плодородие почв в значительной степени зависит от способа обработки и от конструктивных особенностей обрабатывающего инструмента. С целью интенсификации процесса, повышения качества, снижения энергозатрат при обработке почв предложено конструкцию зубчатого рабочего органа (ЗРО). Поставленная задача испытать работоспособность нового ЗРО, исследовать механику разрыхления почвы при обработке ее рабочим органом и разработать модель взаимодействия почвы с поверхностями зубцов рабочего органа.

Методы исследования. Разработаны математические модели механики разрыхления почвы при ее обработке рабочим органом. Процесс разрыхления состоит из двух последовательных фаз. В первой фазе слой почвы разрушается при прохождении лобной поверхности инструмента, которая выполнена по логарифмической спирали. Разрушение почвенного пласта в первой фазе зависит от скорости движения машины и от характерного угла логарифмической спирали, по которой исполнена лобовая поверхность ЗРО. Дальше слой разрыхляется на волнистой поверхности синусного цилиндра. После разрыхления почвы на лобовой поверхности ЗРО почва попадает на волнистую поверхность уже значительно разрыхленной. При этом пласт получает деформации перегиба на синусной поверхности, что дополнительно и более качественно разрушает целостность и разрыхляет пласт почвы за счет поочередных деформаций растяжения (разрыва) и сжатия, вызванных впадинами и выступами синусной поверхности ЗРО. Комбинация спиральной и синусной поверхностей зубчатого рабочего органа обеспечивает высокое качество и энергоэффективность обработки почвы.

Научная новизна. Учитывая современные аграрные реалии и перспективы Украины, обработка почвы новым зубчатым инструментом с комбинированными рабочими поверхностями в виде логарифмической спирали и синусного цилиндра является своевременным, актуальным и новым направлением в сельскохозяйственной науке.

Практическая ценность. Разрушение почвенного пласта при обработке его существующими рабочими органами в основном осуществляется вследствие деформаций разрыва со сдвигом.

При обработке предлагаемым зубчатым рабочим органом за счет копирования сложного профиля рабочих поверхностей ЗРО дополнительно в почве возникают напряжения сжатия растяжения и изгиба. Неоднородное поле деформаций способствует высокому качеству разрыхления пласта во время обработки почвы с минимальными энергозатратами.

Ключевые слова: обработка почвы, зубчатый рабочий орган (ЗРО), логарифмическая спираль, лобовая поверхность, волнистая поверхность, синусный цилиндр.

Shanina Z., Martovitsky L., Glushko V. Peculiarities of the mechanics of milling of the soil layer when processing it with a geotheric working body

Purpose. Chernozems of Ukraine are one of the main values of the state and its strategic resource. The quality and fertility of soils largely depends on the processing method and on the design features of the processing tool. In order to intensify the process, improve the quality, reduce energy costs in the treatment of soils, the design of a gear working organ (GWO) is proposed. The task is to test the work capacity of the new GWO, to investigate the mechanics of loosening the soil when processing it with a working organ and to develop a model for the interaction of the soil with the surfaces of the teeth of the working organ.

Methods of research. Mathematical models of the mechanics of loosening of the soil have been developed during its processing by the working organ. The process of loosening consists of two successive phases. In the first phase, the soil layer collapses as the frontal surface of the instrument passes through a logarithmic spiral. Destruction of the soil layer in the first phase depends on the speed of the machine and on the characteristic angle of the logarithmic spiral along which the head of the GWO is executed. Further, the layer loosens on the undulating surface of the sinus cylinder. After loosening the soil on the frontal surface of the GWO, the soil falls on a wavy surface already considerably loosened. In this case, the layer gets deformations of the inflection on the sinus surface, which additionally and more qualitatively destroys the integrity and loosens the soil layer due to the alternate strains of expansion and compression, caused by depressions and protrusions of the sinus surface of the GWO. The combination of spiral and sinus surfaces of the gear working element ensures high quality and energy efficiency of tillage.

Scientific novelty. Taking into account modern agrarian realities and prospects of Ukraine, tillage with a new serrated tool with combined working surfaces in the form of a logarithmic spiral and sinus cylinder is a timely, relevant and new direction in agricultural science.

Practical value. The destruction of the soil layer when it is processed by existing working bodies is mainly due to distraction deformation with shear.

When processing the proposed gear operating body by copying a complex profile of the working surfaces of the GWO, additional tensile and flexural compression stresses are created in the soil. A non-uniform deformation field promotes a high quality of loosening of the formation during soil cultivation with minimal energy input.

Key words: soil cultivation; gear working organ (GWO), logarithmic spiral, frontal surface, wavy surface, sinusoidal cylinder.
