



Конструкція і теорія сільськогосподарських машин Construction and theory of agricultural machines

УДК 631.31

Совершенствование рабочих органов ротора рыхлительно-сепарирующей почвообрабатывающей машины обеспечивающих минимальные затраты энергии на его работу

Ю.Н. Сыромятников

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
им. П. Василенко (г. Харьков, Украина), gara176@meta.ua*

Обоснована форма ножа ротора почвообрабатывающей машины обеспечивающая минимальные затраты энергии на его работу. Рассмотрена работа рабочих органов ротора рыхлительно-сепарирующей почвообрабатывающей машины в трех положениях относительно почвы и сепарирующей решетки. Определены три фазы работы: от момента вхождения ножа в почву до сепарирующей решетки, момента движения ножа над сепарирующей решеткой, от момента движения ножа над сепарирующей решеткой и до выхода из почвы. Крутящий момент ротора определен расстоянием от поверхности почвы элементарной площадки, радиусом ротора, углом между направлением действия нормальной силы и перпендикуляром к радиусу вращения силы, силой трения элементарной площадки, радиусом вращения элементарной площадки.

Ключевые слова: почва, крутящий момент, работа ножа, энергия, сепарирующая решетка, ротор.

Введение. Получение высоких и стабильных урожаев зависит не только от плодородия почвы, но и от сохранения её структуры и недопущения эрозии. Современные мировые тенденции на получение экологически чистой продукции требуют отказа от химических средств борьбы с сорными растениями. Рабочие органы почвообрабатывающих машин не обеспечивают рационального воздействия на почву. Поэтому для усовершенствования процессов обработки почвы необходим комплексный подход к вопросам уменьшения разрушения рабочими органами машин и орудий структуры почвы и разработки технологических процессов, обеспечивающих совершенствование технологий выращивания сельскохозяйственных культур с целью снижения затрат на получение продукции.

Постановка проблемы. При взаимодействии ножа ротора с почвой крутящий момент не является величиной постоянной и изменяется со временем. Анализ работы показал, что крутящий момент достигает наибольшей величины при максимальном погружении ножа ротора в почву. Пашенко В.Ф. с помощью метода прямого вариационного исчисления был обоснован профиль ножа, обеспечивающий минимальное значение

крутящего момента только в определенных положениях [1]. Однако, полученная форма рабочей кромки ножа не обеспечивает минимальной затраты энергии на работу как отдельного ножа, так и ротора в целом. Наиболее полным показателем работы ножа ротора являются затраты энергии на выполнение одного полного цикла, т.е. одного оборота ножа.

Анализ исследований и публикаций. Процессы взаимодействия рабочих органов с почвой исследовали ученые: В.П. Горячкин, П.М. Василенко, Т.М. Синеоков, В.И. Ветехин, В.А. Дубровин, В.Ф. Пашенко и др

Применение активных рабочих органов в почвообрабатывающих машинах позволяет за один проход агрегата обеспечить высокое качество обработки почвы. Как правило, в таких машинах применяется комбинация рабочих органов [2, 3].

Роторные рабочие органы обеспечивают достаточно хорошее измельчение комочков почвы в поверхностном слое и в сравнении с рабочими органами борон и культиваторов оставляют на поле после своего прохода меньше микронеровностей.

Однако широкого распространения почвообрабатывающие машины с активными рабочими

органами не получили из-за большой энергоемкости и ненадежности в эксплуатации [4, 5]. Это объясняется тем, что затраты энергии на отбрасывание почвы ножами ротора составляют от 30 до 70% общих затрат в зависимости от глубины обработки почвы [6, 7].

Применение на почвообрабатывающих машинах активно-пассивных рабочих органов позволяет улучшить качество крошения пласта почвы с одновременным снижением энергетических затрат. Активные рабочие органы крошат пласт почвы, пассивные при этом обеспечивают его подпор. Такие рабочие органы при установке одного впереди другого обеспечивают снижение крутящего момента на привод ротора и тягового сопротивления лемеха на 20 - 40% [8].

В таком случае на привод ротора почвообрабатывающей рыхлительно-сепарирующей машины расходуется около 20% общих затрат энергии. Одним из возможных вариантов снижения энергоемкости процесса работы роторных рабочих органов является совершенствование геометрической формы ножей ротора [9, 10, 11].

Постановка задачи. Изыскать форму ножа ротора почвообрабатывающей рыхлительно-сепарирующей машины обеспечивающих минимальные затраты энергии на его работу.

Основной материал. На нож ротора (рис. 1) действует нормальная сила давления почвы, сила трения почвы о его режущую кромку, сила трения о боковую поверхность. Для определения крутящего момента на привод одного ножа ротора воспользовались результатом известных исследований. [12]. Величина элементарного крутящего момента ротора определяется, расстоянием от поверхности почвы элементарной площадки, радиуса ротора, угла между направлением действия нормальной силы и перпендикуляром к радиусу вращения силы, силы трения элементарной площадки, радиусом вращения элементарной площадки [13].

Задача сводится к нахождению значений коэффициентов, определяющих профиль ножа ротора. Взяв частные производные и приравняв их нулю, получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_{0i}}{\partial C_i} = & \int_{x_0}^{x_1} \left\{ (1 + \tan^2 \theta)^{\frac{1}{2}} \times \right. \\ & \times \left\{ q(1 + z')^{\frac{1}{2}} (\tan^2 \theta - 1) \frac{\partial \rho}{\partial C_i} + \right. \\ & + \rho \left[(1 + z')^{\frac{1}{2}} \left(\frac{t^2 V}{M} \tan^2 \theta - 1 \right) \frac{\partial q}{\partial C_i} + \right. \\ & + q \left(z' \left(\frac{t^2 V}{M} \tan^2 \theta - 1 \right) \times \right. \\ & \left. \left. \left. \times (1 + z')^{\frac{1}{2}} \frac{\partial z'}{\partial C_i} + (1 + z')^{\frac{1}{2}} \frac{t^2 V}{M} \frac{\partial \tan \theta}{\partial C_i} \right) \right] \right\} dx = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $i = \overline{1, 2, 3}$.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial C_i} = & \frac{z' \frac{\partial z}{\partial C_i} - R \sin \alpha_1 \frac{\partial x}{\partial C_i}}{\sqrt{R^2 - 2R(z \sin \alpha_1 + x \cos \alpha_1) + z^2 + x^2}}, \\ \frac{\partial q}{\partial C_i} = & -k(n-1)h^{n-2} \times \\ & \times \frac{\sin(\alpha_T + \alpha_1) + k_1 \cos(\alpha + \alpha_1)}{\sqrt{1 + k^2}} \frac{\partial \rho}{\partial C_i}, \\ \frac{\partial \tan \theta}{\partial C_i} = & \\ = & \left\{ \begin{aligned} & [z'(R \sin \alpha_1 - z) + R \cos \alpha_1 - x] \times \\ & \times \left[(R \cos \alpha_1 - x) \frac{\partial z}{\partial C_i} + \frac{\partial z'}{\partial C_i} \right] - R z \sin \alpha_T \times \\ & \times [z'(R \cos \alpha_1 - x) - R \sin \alpha_1 + z] \times \\ & \times \frac{\partial z}{\partial C_i} - z' \frac{\partial z'}{\partial C_i} \\ & \times [z'(R \sin \alpha_1 - z) + R \cos \alpha_1 - x]^{-2}, \end{aligned} \right\} \times \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} z' = & z'_0 + \frac{2x}{x_k} \cdot (z_k - x_k z'_0) + \\ & + (x - x_k) \cdot (2xC_1 + 3xC_2 + C_3) + \\ & + x^2 C_1 + x^3 C_2 + x C_3; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial z}{\partial C_1} = x^2(x - x_k);$$

$$\frac{\partial z}{\partial C_2} = x^3(x - x_k);$$

$$\frac{\partial z}{\partial C_3} = x(x - x_k);$$

$$\frac{\partial z'}{\partial C_1} = 2x(x - x_k) + x^2;$$

$$\frac{\partial z'}{\partial C_2} = 3x^2(x - x_k) + x^3;$$

$$\frac{\partial z'}{\partial C_3} = (x - x_k) + x.$$

С учетом того, что процесс взаимодействия ножа с почвой можно разделить на три фазы:

- от момента вхождения ножа в почву до сепарирующей решетки;
- момент движения ножа над сепарирующей решеткой;
- от момента движения ножа над сепарирующей решеткой до выхода из почвы.

Уравнение принимает вид:

$$\begin{aligned} A = & \int_{x_{n1}}^{x_{k1}} \int_{\alpha_0}^{\alpha_1} dM_0 dadx + \\ & + \int_{x_{n3}}^{x_{k3}} \int_{\alpha_2}^{\alpha_3} dM_0 dadx + \int_{x_{n3}}^{x_{k3}} \int_{\alpha_2}^{\alpha_3} dM_0 dadx, \end{aligned} \quad (2)$$

где $X_{n1}, X_{n2}, X_{n3}, X_{k1}, X_{k2}, X_{k3}$ – начальные и конечные координаты линии, определяющей режущую кромку ножа ротора в трех фазах его работы; $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – начальные и конечные углы поворота ножа в трех фазах его работы.

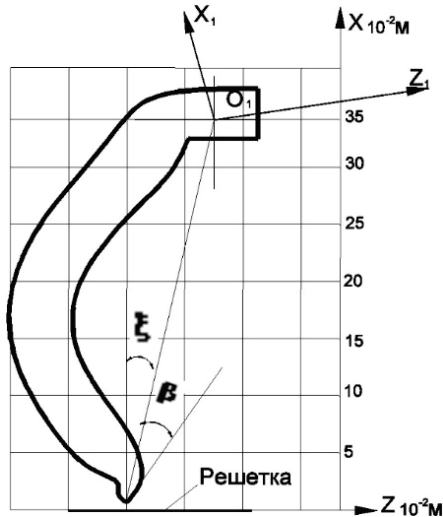


Рис. 1. Профиль рабочей части ножа ротора

Вводим обозначения:

$$B_1 = \frac{K\rho(1 + f\tan\theta)\sqrt{1 + z'^2}}{\sqrt{1 + \tan^2\theta}},$$

$$B_2 = [XK_1 \sin(\alpha + \zeta) - X\cos(\alpha + \zeta) - Z\sin(\alpha + \zeta) - ZK_1 \cos(\alpha + \zeta) - R\cos\alpha + RK_1 \sin(\alpha + \zeta)].$$

Уравнение будет иметь вид:

$$A = \int_{X_{n1}}^{X_{k1}} B_1 B_2 \Big|_{\alpha_0}^{\alpha_1} dx + \int_{X_{n2}}^{X_{k2}} B_1 B_2 \Big|_{\alpha_1}^{\alpha_2} dx + \int_{X_{n3}}^{X_{k3}} B_1 B_2 \Big|_{\alpha_2}^{\alpha_3} dx. \quad (3)$$

Задача исследований состоит в следующем: найти кривую, которая описывает профиль ножа ротора, обеспечивающий минимум функционала и проходит через две заданных граничных точки X_0, Z_0 и X_K, Z_K и выходит с начальной точки под заданным углом.

Уравнение линии будем искать в виде, удовлетворяющем условие постановки задачи.

$$Z = XZ'_0 + X^2 \cdot \frac{Z_K - X_K Z'_0}{X_K^2} + X^2(X - X_K)C_1 + X^3(X - X_K)C_2 + X(X - X_K)C_3, \quad (4)$$

где C_1, C_2, C_3 – постоянные коэффициенты; X_K, Z_K – конечные граничные коэффициенты уравнения.

$$Z'_0 = \operatorname{tg}(\beta + \theta).$$

После подстановки уравнения (4) в (3) задача сводится к нахождению значения постоянных коэффициентов C_1, C_2, C_3 , определяющих форму ножа ротора, которая обеспечивает минимальную величину крутящего момента его привода.

$$Z' = Z'_0 + 2X \cdot \frac{Z_K - X_K Z'_0}{X_K^2} + 2X(X - X_K)C_1 + X^2 C_1 + 3X^2(X - X_K)C_2 + (X - X_K)C_3 + X C_3.$$

$$\frac{\partial Z}{\partial C_1} = X^2(X - X_K),$$

$$\frac{\partial Z}{\partial C_2} = X^3(X - X_K),$$

$$\frac{\partial Z}{\partial C_3} = X(X - X_K),$$

$$\frac{\partial Z'}{\partial C_1} = 2X(X - X_K) + X^2,$$

$$\frac{\partial Z'}{\partial C_2} = 3X^2(X - X_K) + X^3,$$

$$\frac{\partial Z'}{\partial C_3} = (X - X_K) + X = 2X - X_K.$$

Система уравнений решалась численным методом Ньютона. Расчеты производились при следующих значениях:

$$R = 0,35\text{м}, K = 4000, B = 0,03\text{м},$$

$$K_1 = -4, f = 0,5, B = -0,1, l_p = 0,2\text{м},$$

$$\alpha_T = 20^\circ, \zeta = 12^\circ, Z'_0 = 0,9.$$

Тогда уравнение (4), описывающее геометрическую форму рабочей кромки ножа ротора, обеспечивающего минимальные затраты энергии, запишется:

$$Z = 180,4458x^3 - 645,8217x^2 - 0,5575x.$$

Экспериментально энергетические показатели работы рыхлительно-сепарирующей машины с 6 секциями оценивались крутящим моментом привода ротора и его тяговым сопротивлением. Крутящий момент привода ротора определялся для ножа с обоснованным в результате проведения теоретических исследований профилем. Проведение эксперимента осуществлялась при частоте вращения ротора $2,0 \text{ с}^{-1}$ и влажности почвы 22,5 %, среднеквадратическая ошибка эксперимента составила 0,44 Нм. Крутящий момент привода ротора с обоснованной формой составил в среднем 8,41 Нм. Использование ножей с теоретически обоснованным профилем позволяет снизить максимальную величину крутящего момента на его привод до 20,9 Нм, среднее тяговое сопротивление почвообрабатывающей рыхлительно-сепарирующей машины с шестью

секциями, при влажности почвы 22,5 % и твердости 9,7 Н/м², скорости движения 2,09 м/с, частоте вращения ротора 2,0 с⁻¹ и глубине обработки 0,08 м составило 800 Н.

Выводы. Обоснована форма ножа ротора почвообрабатывающей рыхлительно-сепарирующей машины обеспечивающая минимальный расход энергии на его работу. Проведенные экспериментальные исследования показали, что на привод ножа с обоснованной формой требуется затрат энергии на 22% меньше в сравнении с ранее известной формой.

Литература

1. Пащенко В.Ф. Механико-технологические средства эколого-экономического совершенствования процессов обработки почвы: дис. ... Д-ра техн. наук – Х., 2005 – 335 с.
2. Панов И.М., Кузнецов Ю.А. Перспективные направления создания комбинированных почвообрабатывающих и посевных машин (обзор). – М.: ЦНИИТЭИ, 1973. – 45 с.
3. Панов И.М., Орлов Н.М. Основные пути снижения энергозатрат при обработке почвы // Тракторы и сельхозмашины. – 1987. – № 8. – С. 27-30.
4. Бузенков Г.М. Проблема комбинированных машин и орудий // Вестник сельскохозяйственной науки. – 1974. – № 10. – С. 86 - 97.
5. Панов И.М. Перспективные направления создания почвообрабатывающих машин с активными рабочими органами (обзор). – М.: ЦНИИТЭИ, 1972. – 62 с.
6. Виноградов В.И., Леонтьев Ю.С. Взаимодействие ротационных рабочих органов с почвой // Тракторы и сельхозмашины. – 1968. – № 9. – С. 29 - 30.
7. Стародинский Д.З. Пути снижения энергоемкости работы почвенных фрез // Тракторы и сельхозмашины. – 1967. – № 4. – С. 8 - 12.
8. Bernacki H. Praca lednostkowa uprawowyck massun kombinowanych // Beinletun prac naukowobodacenyh. Warszawa, 1964. С. 9 - 63.
9. Бок Н.Б. Технологический расчет почвообрабатывающих фрез // Земледельческая механика. Т.10 / Под ред. В.А. Желиговского. – М.: Машиностроение, 1968. – С. 16 - 23.
10. Борисенко А.И., Таранов И.Е. Векторный анализ и начала тензорного исчисления. 3-е изд. – М.: Высш. шк., 1966. – 252 с.
11. Попов Г.Ф. Обоснование диаметра фрез барабана, формы рабочих органов и скоростных режимов работы фрез // Материалы НТС ВИСХОМ. Вып. 12. – М.: Изд. ОНТИ ВИСХОМ, 1963. – С. 129 -145.
12. Пащенко В.Ф., Кармазин В.И. Обоснование профиля лемеха ножа ротора комбинированной машины / Технічний сервіс АПК, техніка та

технології у сільськогосподарському машинобудуванні: вісн. ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Вип. 23. – Х., 2004. – С. 19 - 24.

13. Пащенко В.Ф., Онишко М.И. Снижение энергоемкости комбинированной машины для обработки почвы и посева / Механизация и электрификация сельского хозяйства: Сб. науч. тр. УНИИМЭСХ. Вып. 70. – Киев, 1989. – С. 17 - 20.
14. Калиниченко В.И., Дорофеева В.И., Шкребец С.М. Введение в метод конечных элементов [спец. курс]. – Х.: ХГУ, 1993. – 40 с.

References

1. Pashchenko V.F. Mekhaniko-tehnologicheskiye sredstva ekologo-ekonomicheskogo usovershenstvovaniya protsessov obrabotki pochvy: dis. ... d-ra tekh. nauk – Kh.. 2005 – 335 s.
2. Panov I.M., Kuznetsov Yu.A. Perspektivnyye napravleniya sozdaniya kombinirovannykh pochvoobrabatyvayushchikh i posevnykh mashin (obzor). – M.: TsNIITEI. 1973. – 45 s.
3. Panov I.M., Orlov N.M. Osnovnyye puti snizheniya energozatrat pri obrabotke pochvy // Traktory i selkhoz mashiny. – 1987. – № 8. – S. 27-30.
4. Buzenkov G.M. Problema kombinirovannykh mashin i orudiy // Vestnik selskokhozyaystvennoy nauki. – 1974. – № 10. – S. 86 - 97.
5. Panov I.M. Perspektivnyye napravleniya sozdaniya pochvoobrabatyvayushchikh mashin s aktivnymi rabochimi organami (obzor). – M.: TsNIITEI. 1972. – 62 s.
6. Vinogradov V.I., Leontyev Yu.S. Vzaimodeystviye rotatsionnykh rabochikh organov s pochvoy // Traktory i selkhoz mashiny. – 1968. – № 9. – S. 29 - 30.
7. Starodinskiy D.Z. Puti snizheniya energoemkosti raboty pochvennykh frez // Traktory i selkhoz mashiny. – 1967. – № 4. – S. 8 -12.
8. Bernacki H. Praca lednostkowa uprawowyck massun kombinowanych // Beinletun prac naukowobodacenyh. Warszawa, 1964. С. 9 - 63.
9. Bok N.B. Tekhnologicheskiy raschet pochvoobrabatyvayushchikh frez // Zemledelcheskaya mekhanika. T.10 / Pod red. V.A. Zheligovskogo. – M.: Mashinostroyeniye. 1968. – S. 16 - 23.
10. Borisenko A.I., Taranov I.E. Vektorny analiz i nachala tenzornogo ischisleniya. 3-e izd. – M.: Vyssh. shk.. 1966. – 252 s.
11. Popov G.F. Obosnovaniye diametra frez barabana. formy rabochikh organov i skorostnykh rezhimov raboty frez // Materialy NTS VISKhOM. Vyp. 12. – M.: Izd. ONTI VISKhOM. 1963. – S. 129 -145.
12. Pashchenko V.F., Karmazin V.I. Obosnovaniye profilya lemekha nozha rotora kombinirovannoy mashiny / Tekhnichniy servis APK. tekhnika ta tekhnologii u silskogospodarskomu mashino-

buduvanni: visn. KhNTUSG im.. P. Vasilenka. – Vip. 23. – Kh.. 2004. – S. 19 - 24.

13. Pashchenko V.F., Onishko M.I. Snizheniye energoyemkosti kombinirovannoy mashiny dlya obrabotki pochvy i poseva / Mekhanizashchiya i

elektrifikatsiya selskogo khozyaystva: Sb. nauch. tr. UNIIMESKh. Vyp. 70. – Kiyev. 1989. – S. 17- 20.

14. Kalinichenko V.I., Dorofeyeva V.I., Shkrebets S.M. Vvedeniye v metod konechnykh elementov [spets. kurs]. – Kh.: KhGU. 1993. – 40 s.

Анотація

Удосконалення робочих органів ротора розрихлювально-сепаруючої ґрунтообробної машини які забезпечують мінімальні витрати енергії на його роботу

Ю.М. Сыромятников

Обґрунтовано форму ножа ротора ґрунтообробної машини яка забезпечує мінімальні витрати енергії на його роботу. Розглянуто роботу робочих органів ротора розрихлювально-сепаруючої ґрунтообробної машини в трьох положеннях щодо ґрунту і сепаруючої решітки. Визначено три фази роботи: від моменту входження ножа в ґрунт до сепаруючої решітки, моменту руху ножа над сепаруючою решіткою, від моменту руху ножа над сепаруючою решіткою і до виходу з ґрунту. Крутний момент ротора визначено відстанню від поверхні ґрунту елементарної площадки, радіусом ротора, кутом між напрямком дії нормальної сили і перпендикуляром до радіусу обертання сили, силою тертя елементарної площадки, радіусом обертання елементарної площадки.

Ключові слова: ґрунт, крутний момент, робота ножа, енергія, сепаруюча решітка, ротор

Abstract

Improvement of the rotor working parts of the ripping-separating tillage machine providing minimum energy consumption for its work

Yu.N. Syromyatnikov

The form of the knife of the rotor of a tillage machine providing the minimum expenditure of energy for its work is substantiated. The work of the rotor working parts of the ripper-separating tillage machine in three positions relative to the soil and separating grid is considered. Three phases of work have been determined: from the moment the knife enters the soil to the separating grid, the moment the knife moves above the separation grid, from the moment the knife moves over the separating grate and to the exit from the soil. The rotor torque is determined by the distance from the surface of the soil of the elementary site, the radius of the rotor, the angle between the direction of action of the normal force and the perpendicular to the radius of rotation of the force, the friction force of the elementary area, the radius of rotation of the elementary area.

Keywords: soil, torque, knife work, energy, separating grating, rotor

Представлено від редакції: В.І. Мельник / Presented on editorial: V.I. Melnyk

Рецензент: В.Ф. Пащенко / Reviewer: V.F. Pashchenko

Подано до редакції / Received: 10.05.2017