УДК 631.5;631.331.

ТЕОРИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА С ПОЧВОЙ: РОТОР ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВОЙ РОТАЦИОННОЙ БОРОНЫ

Науризбаев Аллияр Осербаевич

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, PhD, доцент

E-mail: alliyar85@mail.ru

Annotatsiya. Vertikal aylanish o‘qiga ega rotatsion borona rotorining ishlashi nazariy jihatdan asoslandi va uning texnologik jarayoni bayon qilindi. Kinematik tahlil asosida pichoq traektoriyasi va harakat tenglamalari chiqarildi, kesish tezligi aniqlandi. Sifatli maydalashni ta’minlash uchun pichoqning aylana (chiziqli) tezligi 4,77 m·s^{-1} dan kam bo‘lmasligi kerak (n ≈ 387 min^{-1}). Natijalar vertikal o‘qli rotatsion boronalar uchun oqilona konstruktiv-texnologik parametrlar va ish rejimlarini tanlashda qo‘llanishi mumkin.

Kalit so‘zlar: rotatsion borona; rotorning ishlashi; frezaning pichog‘i; aylanish o‘qi; tuproq bo‘lakchalari (komlar); ishlov chuqurligi; agregatning harakat tezligi; burchak tezligi; kesish tezligi; harakat tenglamalari.

Аннотация: Представлено теоретическое обоснование работы ротора ротационной бороны с вертикальной осью и описан его технологический процесс. На основе кинематического анализа выведены зависимости для траектории и движения ножа, определена скорость резания. Установлено: для качественного крошения окружная скорость ножа ≥4,77 м·с$^{-1}$ (n ≈ 387 мин$^{-1}$). Результаты применимы для выбора рациональных конструктивно-технологических параметров и режимов.

Ключевые слова: ротационная борона, работа ротора, нож фрезы, ось вращения, почвенный комок, глубина обработки, скорость движения агрегата, угловой скорость, скорость резания, уравнения движения.

Abstract. A theoretical justification of the operation of a rotary harrow rotor with a vertical axis of rotation is presented together with its operating process. Based on kinematic analysis, analytical relations for the blade trajectory and equations of motion are derived, and the cutting speed is determined. It is shown that to ensure effective clod crumbling the blade circumferential (linear) speed should be at least 4.77 m·s^{-1} (n ≈ 387 min^{-1}). The results can be used to select rational design–technological parameters and operating modes of vertical-axis rotary harrows.

Keywords: rotary harrow; rotor operation; blade; axis of rotation; soil clod; tillage depth; forward speed of the unit; angular velocity; cutting speed; equations of motion.

Введение

Предпосевная обработка почвы является ключевым фактором, определяющим качество сева, дружность и энергию прорастания семян, а также последующую урожайность сельскохозяйственных культур. В условиях Республики Узбекистан технология предпосевной подготовки традиционно включает ряд автономных операций, выполняемых чизель-культиваторами, зубовыми и дисковыми боронами, а также малыми выравнивателями. Однако на практике требуемые агротехнические показатели не всегда достигаются, особенно на полях после озимых зерновых. Это обусловлено высокой температурой летнего воздуха, ускоряющей испарение влаги, и многократными проходами уборочной и транспортной техники, что приводит к снижению влажности, росту твердости и неоднородности структуры пахотного слоя. В результате отдельные операции приходится повторять, что вызывает избыточное уплотнение и распыление почвы, уменьшение содержания питательных элементов и гумуса, а также затягивание сроков сева, что в конечном счёте негативно отражается на дружности всходов и снижает урожайность [1–6].
Современная агротехника предполагает сокращение числа проходов за счёт применения машин с активными (ротационными) рабочими органами, прежде всего фрез, которые за один проход обеспечивают формирование посевного ложа, улучшают водно-воздушный режим и повышают биологическую активность почвы. Почва, обработанная фрезой, как правило, характеризуется более благоприятными физическими свойствами, создающими условия для роста и развития растений [7, 8]. В этой связи актуальна постановка задачи теоретического обоснования параметров и режимов работы ротационных органов, обеспечивающих высокое качество крошения при минимальных энергетических затратах и без ухудшения структурного состояния почвы.

Цель настоящей работы — теоретически обосновать кинематические и технологические параметры ротора ротационной бороны с вертикальной осью вращения, определяющие траекторию движения ножа и скорость резания, необходимые для формирования качественного посевного слоя при местных почвенно-климатических условиях.

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ

Ротационные почвообрабатывающие машины реализуются с горизонтальной или вертикальной осью вращения рабочих органов. Машины с горизонтальной осью вращения исторически получили наибольшее распространение, однако им присущ ряд недостатков: вынос на поверхность более влажных нижних горизонтов, образование уплотнённого «дискового»

ISSN 3030-3907

дна, ограниченная глубина обработки и пониженная заглубляющая способность на плотных почвах [7–10]. Эти факторы повышают риск потерь влаги, ухудшают структурное состояние пахотного слоя и могут способствовать развитию плужной подошвы.

Альтернативой являются машины с вертикальной осью вращения. Согласно литературным источникам, такие орудия не смешивают верхние и нижние горизонты в той же степени, что способствует сохранению влаги; они имеют меньшее число рабочих органов, менее подвержены забиванию растительными остатками, а привод не ограничивает глубину обработки. Широкий диапазон частот вращения роторов и сменные рабочие органы расширяют область применения в различных почвенно-климатических условиях [9, 10]. Вместе с тем, несмотря на нарастающее распространение таких машин в экономически развитых странах, теоретическая база их проектирования недостаточно унифицирована: остаются открытыми вопросы рациональной траектории движения ножа, диапазонов окружных скоростей для разных гранулометрических составов, а также энергетической оценки процессов крошения и взаимодействия «нож—почва».

Следовательно, назрела необходимость в строгом аналитическом описании технологического процесса работы ротора с вертикальной осью: выводе уравнений траектории ножа и его мгновенных скоростей, определении скоростей резания, связывающих кинематику ротора с качественными показателями крошения и формированием посевного ложа. Теоретическое обоснование этих зависимостей позволит сформулировать критерии выбора конструктивно-технологических параметров (число и форма ножей, радиус, шаг установки, частота вращения) и режимов работы (скорость агрегата, глубина), обеспечивающих требуемые агротехнические показатели при минимальных энергозатратах и без деградации структуры почвы.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как выше отмечалось отличительной особенностью ротационных рабочих органов с вертикальной осью вращения от фрез с горизонтальной осью вращения с Г-образными ножами является то, что он позволяет в значительной степени уменьшить вынос нижних, более влажных слоев почвы на поверхность поля. Улучшить крошение почвы за счет дополнительного воздействия их при обратном движении, привод рабочего органа не ограничивает глубину рыхления.

Технологический процесс работы ротора с вертикальной осью вращения протекает следующим образом (рис.1). При движении агрегата

ISSN 3030-3907

ножи ротора внедряется в предварительно разрыхленную (после пахоты или чизелевания) почву и действует на нее по всей траекторий их движения. При этом почва в хорошо разрыхленном состоянии остается примерно на том же месте, где находилась до обработки.

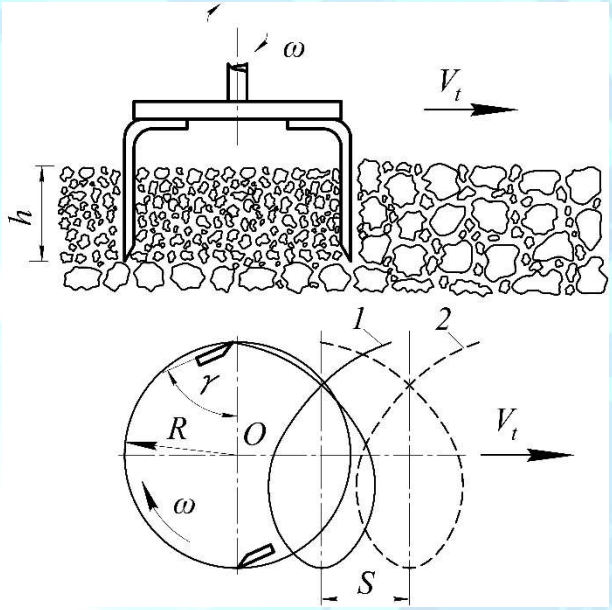


Рис.1. Схема технологического процесса работы ротора и траектория движения ножа:

1-траектория первого ножа; 2-траектория второго ножа

Энергия, необходимая для обработки почвы такими ножами, расходуется на отрезание стружки, образование трещин скалывания и поверхностей разлома почвенных комков, отбрасывание частиц почвы. Поскольку нож фрезы с вертикальной осью вращения работает в предварительно разрыхленной почвенной среде, то есть основания предполагать наличие ударного характера процесса взаимодействия ножа с комком почвы.

ОБСУЖДЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Интенсивность деформации и рыхления почвы активными рабочему органами в основном зависит от их геометрической формы и в большой степени определяется видом их траекторий движения. В процессе работы нож ротора участвует в двух движениях: поступательном вместе с агрегатом со скоростью V_t и вращательном вокруг оси ротора с угловой скоростью ω (рис.2). Выберем систему координатных осей с началом в точке O'. Ось $O'X$ направим по направлению движения агрегата, а ось $O'Y$- перпендикулярно к ней.

Уравнения движения наиболее удаленной от оси вращения ротора точки ножа в параметрической форме имеют вид

ISSN 3030-3907

$$x = V_t t \pm R\sin\omega t; \quad (1)$$

$$y = R(1+\cos\omega t) \quad (2)$$

где R- радиус ротора; t- время, секунд.

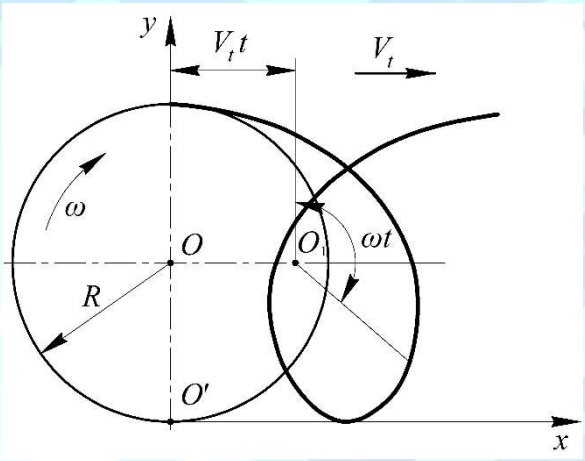


Рис.2. Схема к выводу уравнения движения ротора

Здесь и далее верхний знак в (1) относится к вращению ротора по часовой стрелке, а нижний – против часовой стрелки.

Подставляя в (1) отношение $\lambda=V_0/V_t=R\omega/V_t$, называемое кинематическим параметром (режим работы) ротационной почвообрабатывающей машины, получим

$$x = R(\frac{\omega t}{\lambda} \pm \sin\omega t); \quad (3)$$

$$y = R(1+\cos\omega t) \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) выражают траекторию абсолютного движения точки, геометрически представляющую собой циклоиду. Форма циклоиды зависит от величины λ.

При $\lambda<1$ траектория представляет собой укороченную циклоиду (рис.3), при $\lambda=1$ и $\lambda>1$ соответственно обыкновенную, имеющую вершину в точке A_1, и удлиненную циклоиду, имеющую петли.

Как правило, в ротационных почвообрабатывающих машинах $\lambda>1$, поэтому абсолютная траектория движения их рабочих органов будет представлять удлиненную циклоиду или трохоиду.

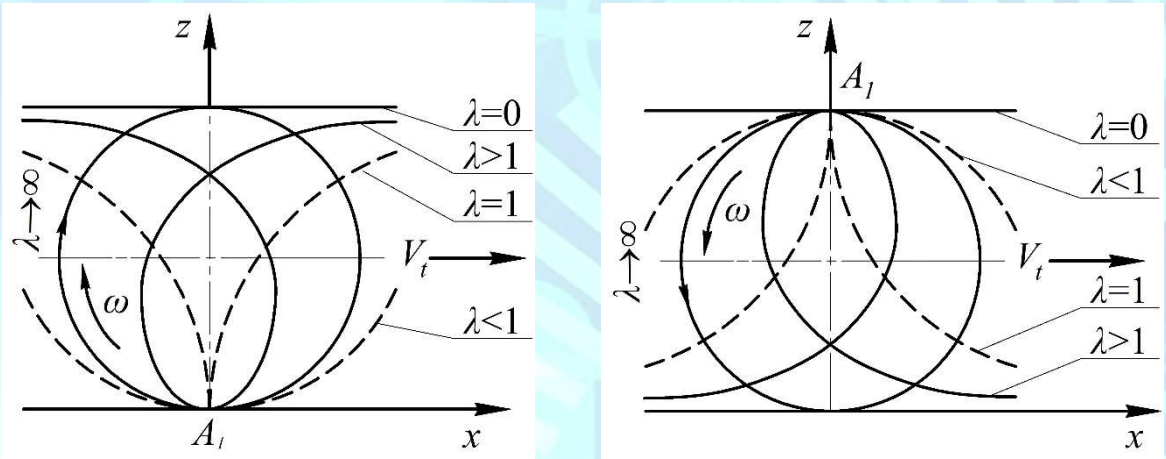
Как известно [11] удлиненная циклоида обладает узловыми точками, т.е. точками A_1 и B_1 (рис.3). Число и расположение этих точек зависят от значения λ. До тех пор, пока значение λ не превосходит числа λ=4.60333, все узловые точки расположены на прямых $x=k\pi r$ (где k – целое нечетное число, $r=V_t/\omega$), причем на каждой из этих прямых лежит одна узловая точка: точка A_1 на прямой $x=\pi V_t/\omega$; точка B_1 на прямой $x=3\pi V_t/\omega$ и т.д. Эти точки можно найти, решив уравнение

ISSN 3030-3907

$$\alpha \pm \lambda \sin\alpha = \pi, \qquad (5)$$

где $\alpha=\omega t$ - угол поворота рассматриваемой точки от начального положения.

Пусть для ротора, вращающегося по часовой стрелке λ=3.



а) *б*)

Рис. 3. Абсолютная траектория движения точки ножа ротора при различных кинематических параметрах:

а, *б* – соответственно при вращении ротора и по часовой стрелке

Решив уравнение (5) при λ=3 графическим путем (рис.5), найдем α=47°25′, соответствующей узловой точке A_1 (рис.4).

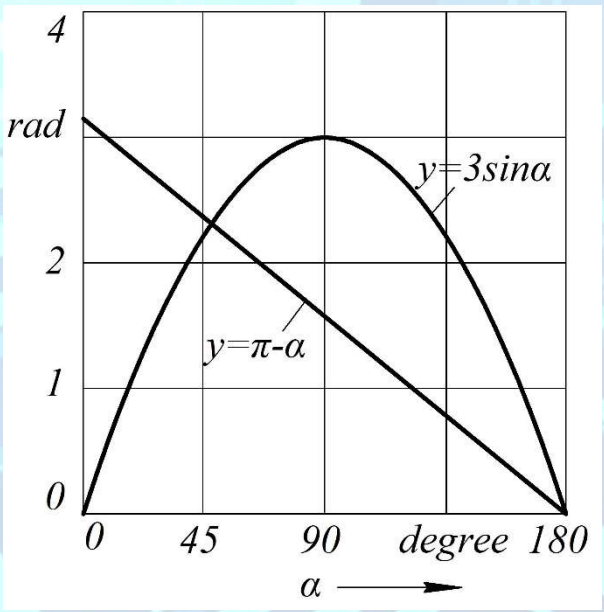


Рис. 4. Схема к определению узловых точек траектории движения ножа

Ординату $У_1$ этой точки находим, пользуясь уравнением

$$У_1 = AA_1 = R(1+\cos\alpha) = 0.1175\cdot(1+\cos 47^0 25') = 0.197 \ \ m \qquad (6)$$

При $\lambda_0<\lambda<\lambda_1$ (где λ_1=7.78968…) в циклоиде кроме рассмотренных выше узловых точек появляются узловые точки на прямых $x=(k+1)\pi r$, по

ISSN 3030-3907

одной паре на каждой из этих прямых: точки A_1, A_3 на прямой $x=2\pi V_t/\omega$ (рис.6), точки B_2, B_3 на прямой $x=4\pi V_t/\omega$ и т.д.

Эти точки можно найти, решив уравнение:

$$\alpha \pm \lambda \sin\alpha = 2\pi, \qquad (7)$$

По мере дальнейшего роста значение λ у циклоиды появляется все новые пары узловых точек: сначала по одной паре точек на прямых $x=k\pi r$, а затем по одной паре точек на прямых $x=(k+1)\pi r$ и т.д. попеременно.

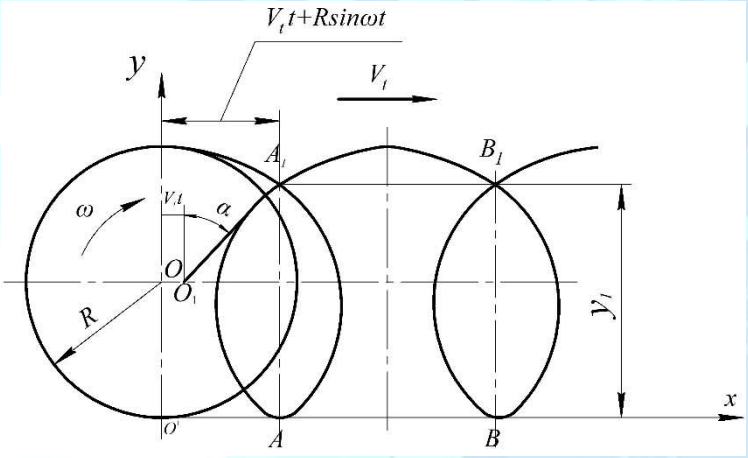


Рис. 5. Графики функций $y=3\sin\alpha$ и $y=\pi-\alpha$

Таким образом, из изложенного следует, что степень воздействия ножей ротора на почву главным образом зависит от λ. Чем больше λ, тем больше интенсивность воздействия их на почву. Однако с увеличением λ возрастают энергозатраты на обработку почвы [12].

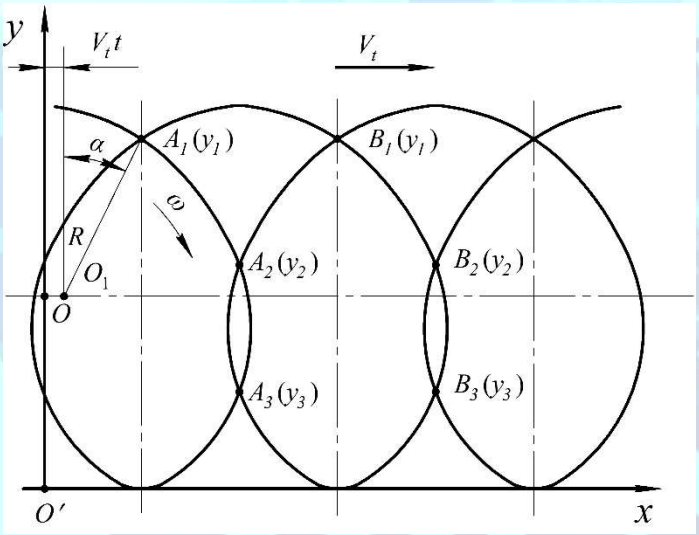


Рис.6. Точки пересечения траекторий удлиненной циклоиды (при $\lambda_0<\lambda<\lambda_1$)

Скорость резания почвы в любой момент времени направлена по касательной к абсолютной траектории движения ножа ротора (рис.7).

ISSN 3030-3907

Скорость резания или абсолютная скорость движения ножа определяется как первые производные координат точек по времени, используя уравнения движения (1) и (2), т.е.

$$V_o = \frac{dx}{dt} = V_t \pm R\omega\cos\omega t = V_t \pm V_o\cos\omega t \qquad (8)$$

$$V_o = \frac{dx}{dt} = -R\omega\sin\omega t = -V_o\sin\omega t \qquad (9)$$

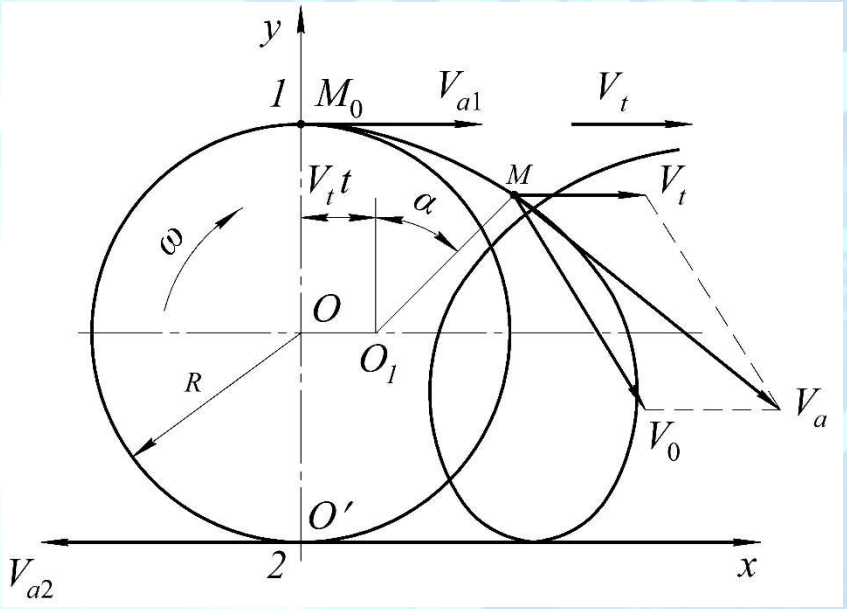


Рис.7. Схема к определению абсолютной скорости точки *M* ротора

Модуль абсолютного скорости ножа ротора

$$V_a = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = \sqrt{V_t^2 \pm 2V_tV_o\cos\omega t + V_o^2} \qquad (10)$$

Учитывая, что $\lambda=V_0/V_t$ и $\omega t=\alpha$ уравнения (10) можно представить в следующем виде

$$V_a = V_t\sqrt{\lambda^2 \pm 2\lambda\cos\alpha + 1} \qquad (11)$$

Из этого уравнения следует, что абсолютная скорость ножа ротора, иначе скорость резания почвы, величина переменная и изменяется в зависимости от угла поворота ротора в относительном движении.

Абсолютная скорость точек 1 и 2 (рис.7), расположенных на оси ротора, перпендикулярной к направлению его движения, определяются соответственно как

$$V_{a1} = V_o + V_t = V_t(1+\lambda) \qquad (12)$$

и

$$V_{a2} = V_o - V_t = V_t(\lambda - 1) \qquad (13)$$

ISSN 3030-3907

На рис.8 показано изменение абсолютной скорости ножа ротора в зависимости от угла его поворота вертикальной оси при V_t=1.5 m/s, R=0.1175 m и различных значения λ.

Анализируя данные, приведенные на рис.8, приходим к выводу, что минимальное значение абсолютной скорости ротора приходится углу поворота его на 180° при всех рассматриваемых значениях показателя кинематического режима λ. Следовательно, на характер изменения абсолютной скорости ротора этот показатель не влияет.

На практике обычно для определения абсолютной скорости любой точки ножа, лежащей на окружности ротора, воспользуется годографом скоростей [12].

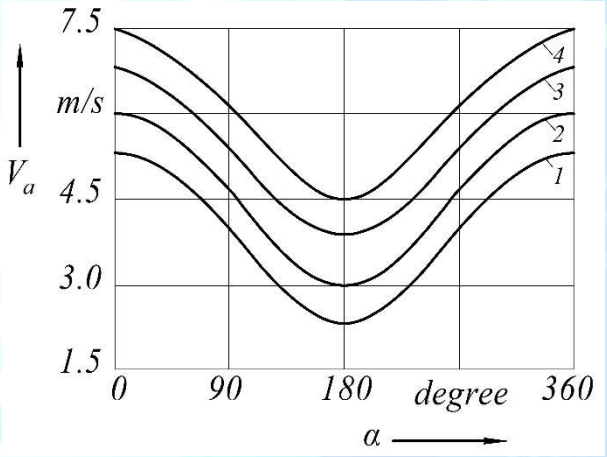


Рис.8. Изменение абсолютной скорости ротора в зависимости от угла α его поворота:

1 – при λ=2.50; 2 – при λ=3.00; 3 – при λ=3.50; 4 – при λ=4.00

Для построения годографа абсолютной скорости ножа необходимо соединить концы векторов V_{a1} и V_{a3} прямой линией и из точки O_2 пересечение этой линии с продольным диаметром ротора провести окружность, проходящую через концы векторов V_{a1} и V_{a3} (рис.9).

ISSN 3030-3907

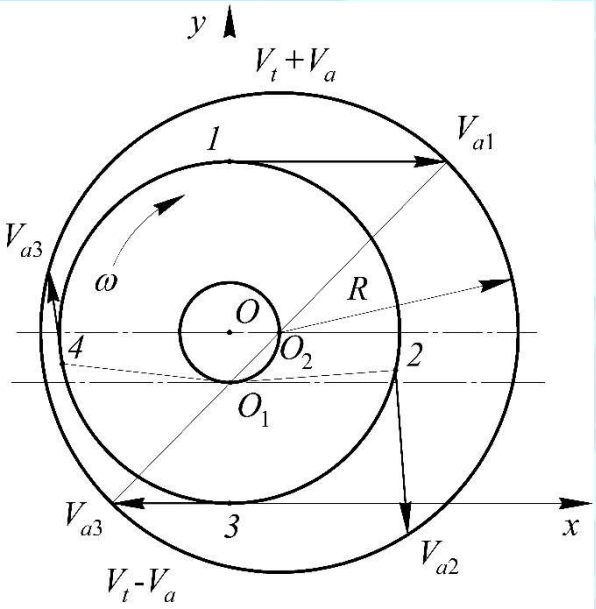


Рис.9. Годограф абсолютной скорости ножа ротора

Как следует из рис.9 радиус окружности годографа

$$R_r = \sqrt{R^2 + \left(\frac{V_t + V_o}{K_V} - \frac{V_t}{K_V}\right)^2} = \sqrt{\left(R^2 + \frac{\omega}{K_V}\right)^2}, \qquad (14)$$

где K_V - масштаб скорости.

Абсолютная скорость точек окружности ротора равна по модулю произведению его угловой скорости ω на радиус, проведенной из мгновенного центра вращения O_1 к данной точке и направлена по нормали к этому радиусу.

Представленная на рис.9 схема наглядно показывает изменение абсолютной скорости ножа ротора как по величине, так и по направлению за полный оборот ротора.

С целью обеспечения качественного крошения комков и глыб, почвы минимальная абсолютная скорость ножа должна быть равна или больше критической скорости, при которой произойдет их разрушение [12], т.е.

$$V_{o\min} = V_o - V_t \geq V_{cr} = \sigma_V \sqrt{\frac{(J + mR^2)}{3EJ\rho(1-k^2)}}, \qquad (15)$$

где σ_V- предел прочности комков почвы, MPa;

J - момент инерции ротора относительно оси вращения, kgm^2;

m - масса комка почвы, взаимодействующего с ножом, kg;

E - модуль упругости комка почвы, MPa;

k - коэффициент восстановления комка почвы;

ρ - плотность комка почвы, kg/m^3;

Решая неравенство (15) относительно V_o, получим

ISSN 3030-3907

$$V_o \geq \sigma_V \sqrt{\frac{(J+mR^2)}{3EJ\rho(1-k^2)}} + V_t \qquad (16)$$

Принимая V_t=2.0 m/s и подставляя (16) известные значения σ_V=0.15 MPa, E=1.9 MPa, ρ=1200 kg/m^3, m=1.02 kg, J=0.02 kgm^2 и R=0.1175 m, получим, что для обеспечения качественного крошения комков почвы, образованных при вспашке, окружная скорость ножа ротора должно быть не менее 4.77 m/s.

Расчеты, проведенные по известным формулам, показали, что для обеспечения этой окружной скорости ротора его частота вращения должна быть – 387 min^{-1}.

Определим модуль и направления ускорения ротора. Для этого примем, что он вращается равномерно с угловой скоростью ω и агрегат движется с постоянной поступательной скоростью V_t. Тогда проекции ускорения ротора на координатные оси x и y будут равны

$$W_X = \frac{d^2X}{dt^2} = \pm\omega^2 R\sin\omega t \qquad (17)$$

$$W_y = \frac{d^2Y}{dt^2} = -\omega^2 R\cos\omega t \qquad (18)$$

Модуль ускорения ротора

$$W = \sqrt{W_X^2 + W_y^2} = \omega^2 R \qquad (19)$$

Таким образом, как следует из (17), (18) и (19) любая точка ножа ротора будет иметь только центростремительное ускорение, направленное к его центру.

ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

По результатам теоретические обоснование работы ротора ротационный бороны выявлено, что:

- для обеспечения качественного рыхления почвы при минимальных энергозатратах окружная скорость должна быть не менее 4.77 m/s, подача нож - 10-15 cm, кинематический режим работы - около 3.
- для исключения отбрасывания большего объема почвы и сметания обработанную почву задней гранью ножа, угол установки его должен быть 59-60° при выбранном режиме ротора.
- мощность, потребляемая ротором, зависит от фермы ножа и формы его заточки, его конструктивных параметров, а также от технологических и скоростных режимов работы.

ISSN 3030-3907

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУР

1. Håkansson I. Effects of seedbed properties on crop emergence. 1. Temporal effects of temperature and sowing depth in seedbeds with favourable properties // Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science. — 2011. — Vol. 61, No. 5. — P. 458–468. — DOI: 10.1080/09064710.2010.506446.
2. St. John L., Tilley D. J., Ogle D., Jacobs J., Holzworth L., Wiesner L. Principles of Seedbed Preparation for Conservation Seedings. — Boise, ID: USDA–NRCS, Plant Materials Technical Note No. 13, Oct. 2011. — 13 p.
3. Håkansson I., Myrbeck Å., Etana A. A review of research on seedbed preparation for small grains in Sweden // Soil & Tillage Research. — 2002. — Vol. 64. — P. 23–40. — DOI: 10.1016/S0167-1987(01)00255-0.
4. Lamichhane J. R., Boiffin J., Boizard H., Dürr C., Richard G. Seedbed structure of major field crops as affected by cropping systems and climate: Results of a 15-year field trial // Soil & Tillage Research. — 2021. — Vol. 206. — Article 104845. — DOI: 10.1016/j.still.2020.104845.
5. Balsari P., Biglia A., Comba L., Sacco D., Eloi Alcatrão L., Varani M., Mattetti M., Barge P., Tortia C., Manzone M., Gay P., Ricauda Aimonino D. Performance analysis of a tractor–power harrow system under different working conditions // Biosystems Engineering. — 2021. — Vol. 202. — P. 28–41. — DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2020.11.009.
6. Celik A., Altikat S. The effect of power harrow on the wheat residue cover and residue incorporation into the tilled soil layer // Soil & Tillage Research. — 2022. — Vol. 215. — Article 105202. — DOI: 10.1016/j.still.2021.105202.
7. Varani M., Mattetti M., Molari G., Biglia A., Comba L. Correlation between power harrow energy demand and tilled soil aggregate dimensions // Biosystems Engineering. — 2023. — Vol. 225. — P. 54–68. — DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2022.11.008.
8. Ожерельев В. Н. Моделирование процесса взаимодействия с почвой рыхлительных пальцев ротационной бороны // Инновационная техника и технология. — 2022. — Т. 9, № 4. — С. 46–52.
9. Садыков Р. О. Обоснование режимов работы и параметров ротора ротационной бороны с вертикальной осью вращения: автореф. дис. … канд. техн. наук. — Янгиюль, 2000. — 16 с.
10. Xu N., Liu J., Ma H., Zhang T., Lei S., Mu Y., Gao W., Shi Y. Design and optimization of power harrow soil crushing components for coastal saline–alkali land // Agriculture. — 2025. — Vol. 15, No. 2. — Article 206. — DOI: 10.3390/agriculture15020206.

ISSN 3030-3907

11. Канарев Ф. М. Ротационные почвообрабатывающие машины и орудия. — М.: Машиностроение, 1983. — 142 с.
12. Синеоков Г. Н., Панов И. М. Теория и расчёт почвообрабатывающих машин. — М.: ООО «УМЦ «Триада», 2014. — 222 с. — ISBN 978-5-9546-0089-6

ISSN 3030-3907