

3. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОК

УДК 630*3

**Д.Ю. Дручинин, Л.Д. Бухтояров, М.А. Гнусов, М.Н. Лысыч,
В.Р. Фатхулин**

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ФРЕЗЕРНОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА ОРУДИЯ ДЛЯ УХОДА ЗА НАСАЖДЕНИЯМИ В РЯДАХ ДЕРЕВЬЕВ

Введение. На рост и развитие древесных растений, помимо прочих факторов, немаловажное влияние оказывает дополнительная обработка почвы в процессе их выращивания. Она заключается в рыхлении верхнего почвенного слоя на глубину до 5...10 см для насыщения его кислородом и удаления конкурирующей сорной растительности.

Применительно к лесному хозяйству принятая технология агротехнического ухода за созданными лесными культурами предусматривает проведение дополнительной обработки почвы в насаждениях, либо методом седлания рядка, либо в их междурядьях. Для механизированного осуществления данной технологической операции разработаны различные машины и орудия: лесные культиваторы – КЛБ-1,7, КФЛ-1,4, КРЛ-1, КБЛ-1А и т. д. с дисковыми, фрезерными или ротационными рабочими органами для обработки почвы в междурядьях; пропашные культиваторы – КЛ-2,6, КРН-2,8 и другие [Винокуров и др., 2004]. Однако требования к работе данных орудий подразумевают оставление защитной зоны с каждой стороны обрабатываемого ряда. Пропашные культиваторы обрабатывают площадь в междурядьях без механического воздействия на почву в приствольных зонах растений. Поэтому чаще всего непосредственно в ряду лесные культуры освещаются вручную при помощи мотокусторезов и триммеров, что непроизводительно с учетом дефицита людских ресурсов в лесохозяйственной отрасли.

Анализ технологии ухода за созданными культурами в садоводстве, виноградарстве и плодоводстве позволил оценить уровень развития механизации ухода за многолетними насаждениями: обработка почвы в ряду плодовых культур осуществляется орудиями, рабочий орган которых движется в ряду растений, а, приближаясь к штамбу дерева, оставляет защитную зону

[Бычков и др., 2011]. Для этого технические средства оснащены автоматической системой линейного или дугообразного увода рабочего органа из ряда обрабатываемых растений без их повреждения с вынесенным вперед чувствительным щупом [Филиппов и др., 2018a].

В конструкции садовых орудий для приствольных полос в качестве рабочих органов используются пассивные или активные механизмы, однако наибольшую эффективность показывают компактные почвообрабатывающие фрезы с вертикальной осью вращения, которые, обрабатывая почву на глубину до 5...10 см, взрыхляют её, насыщают воздухом и удаляют сорную растительность [Дручинин и др., 2023].

По результатам ранее выполненных исследований установлено, что энергоёмкость рабочего процесса орудий для обработки почвы в рядах культур с вертикальной осью вращения фрезерной секции выше, чем для машин с пассивными исполнительными механизмами, из-за геометрических и кинематических особенностей их рабочих органов [Блохин и др., 2017]. Обратная ситуация наблюдается для тягового сопротивления: у орудий с боронами или ножами оно выше, чем у вертикально расположенных почвообрабатывающих фрез. Поэтому в работе Белоусова С.В. с соавторами [2023] отмечается, что оценка траектории режущих элементов фрез является обязательным этапом исследования в процессе их проектирования.

Результаты исследований Н.Н. Андержановой [2023] также подтверждают, что при решении задачи обеспечения минимальных затрат энергии на фрезерование почвы необходимо учитывать траекторию движения и направление вращения фрезы, технологические и кинематические показатели работы фрез.

Несмотря на качественное рыхление почвы, отрицательным моментом в работе таких орудий является большой разброс почвенных масс по сторонам от обрабатываемого ряда растений вследствие вращения фрезы, особенно при обработке легких почв. Поэтому, помимо задачи снижения энергоёмкости рабочего процесса, немаловажной задачей при разработке орудий для приствольной обработки насаждений можно считать недопущение излишнего смещения почвы из ряда ротационным рабочим органом и при обходе приштамбовой зоны растения.

Фрезерные машины, например, ФЛУ-0,8 или ФЛШ-1,2, применяются и в лесном хозяйстве, однако их основное назначение – полосная обработка почвы на вырубках для создания лесных культур, вследствие чего данная техника имеет другой принцип исполнения: рабочий орган выполнен в виде горизонтального протяженного барабана с ножами или шнеками.

На основе обобщения данных анализа конструктивных и технологических особенностей работы садовых и лесных фрез в ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова разработано орудие для обработки почвы в рядах многолетних насаждений (рис. 1), где в качестве рабочего органа использована фреза с вертикальной осью вращения, имеющая механизм дугообразного увода из обрабатываемого ряда насаждений. Для снижения разброса почвы основными режущими элементами в конструкции фрезы имеются размещенные по периферийной части основного диска дугообразные ножи.

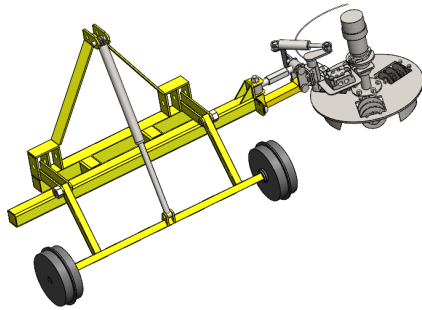


Рис. 1. Конструкция орудия для обработки почвы в рядах многолетних насаждений

Fig. 1. Construction of tools for tillage in rows of perennial plantings

Обзор ранее выполненных исследований показывает, что большинство имеющихся работ посвящено оценке кинематики фрезерных барабанов с горизонтальной осью вращения сельскохозяйственных или садовых орудий.

Р.А. Филипповым с соавторами [2018b] исследован рабочий процесс фрезерной секции при рядной обработке почвы в плодовых насаждениях. Инженерные расчеты с использованием положений высшей математики дали возможность построить траекторию движения выносной секции при обработке почвы в ряду деревьев. На основании проведенных исследований разработана садовая фреза с выносной секцией, на которой горизонтально установлен фрезерный барабан оптимальной ширины 0,55 м. При этом установлено, что для исключения повреждения растений в ряду поперечное защитное расстояние должно быть не менее 0,20 м в каждую сторону, а вдоль линии ряда рабочий орган должен выводиться из него не менее чем за 0,38 м до штамба дерева.

С.В. Белоусов с соавторами [2023], исследуя в своей работе кинематику ротационных почвообрабатывающих машин, рассмотрел сложное движение фрезы. Было составлено параметрическое уравнение криволинейной

траектории движения точки ножа горизонтального фрезерного барабана. Установлено, что величина подачи на нож требует подбора в зависимости от конкретных почвенных условий.

В рамках схожей тематики научным коллективом под руководством F. Tolvaly-Rosca была изучена кинематика и динамика ротационной бороны с активными ножевыми рабочими органами [Tolvaly-Rosca et al., 2021]. Теоретические исследования, выполненные с учётом сопротивления почвы при резании, позволили наглядно оценить траекторию вращающихся ножей и влияние на нее и рабочий процесс различных параметров конструкции бороны: было изучено влияние изменения угла наклона ножей бороны, скорости движения и угловой скорости на траектории движения, которые являются циклоидами. В дальнейшем полученные данные можно использовать для определения параметров, влияющих на движение ножей, и анализа их влияния на процесс обработки почвы.

Исследованиям кинематики фрезерных машин для предпосевной обработки почвы в сельском хозяйстве посвящена работа А.Е. Гладкова [2020]. Автором рассмотрен процесс равномерного вращения фрезерного барабана с угловой скоростью ω , который движется с постоянной поступательной скоростью. Установлено, что длина пути резания зависит от радиуса барабана, кинематического параметра λ , равного отношению окружной скорости рабочего органа к поступательной скорости агрегата, глубины обработки, числа ножей и направления вращения барабана.

Влияние аналогичного кинематического параметра λ на измельчение почвы в зависимости от конструктивных параметров и режима работы ротационной сельскохозяйственной бороны с вертикальными роторами было рассмотрено D. Guglev [2011]. Автор отмечает, что основными кинематическими характеристиками режимов работы вертикальных роторов являются тип и характер траектории движения вертикальных лопастей, для чего были составлены уравнения, описывающие их траекторию, полученные путем совместного решения параметрических уравнений движения. Установлено, что критический кинематический параметр вертикального ротора равен 2,97.

Цель исследования. Составление математического описания движения фрезерного рабочего органа с дугообразным уводом в процессе обработки почвы орудием в ряду многолетних насаждений для оценки кинематических параметров рабочего процесса.

Материалы и методы. На основании соотношений классической физики и математики известно, что геометрическая форма траектории сложного движения какой-либо точки рабочего органа будет зависеть от соотношения скоростей – относительной и переносной (рис. 2).

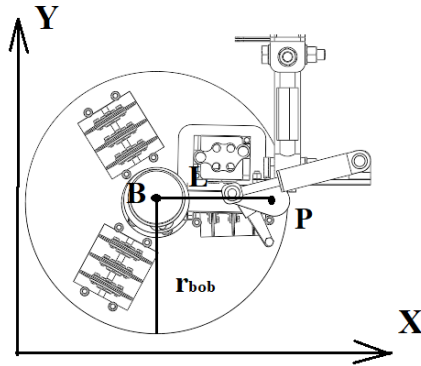


Рис. 2. Система координат для оценки рабочего перемещения фрезерной секции

Fig. 2. Coordinate system for estimating the working travel of the rotary cultivator section

При оценке траектории отклонения точки на острие ножа вертикальной фрезы по дуге окружности необходимо одновременно учитывать поступательную скорость $V_{тр}$ трактора (подачу), скорость отвода выдвижной фрезерной секции V_k гидроцилиндром и относительную скорость вращения фрезы $V_{фр}$. Точка K на острие ножа фрезы описывает результирующую траекторию движения со скоростью V_p , значение которой, как и направление, динамично изменяется, в результате чего траектория точки K представляет собой кривую сложной формы.

Примем допущение, что относительная скорость вращения фрезы $V_{фр}$ не влияет на конфигурацию обработанной зоны, а биение фрезерного рабочего органа в вертикальной плоскости не оказывает значительного влияния на кинематику, и рассмотрим задачу в плоскости XOY . Орудие движется поступательно вправо по оси OX , а кривошип L , на котором установлена фреза, работает как кулиса, то есть движется по полудуге как по OX , так и по OY . Динамику (инерцию, гравитацию) в текущей постановке задачи не учитываем.

Рассмотрим рабочее перемещение фрезерной секции как процесс движения маятника, рама которого движется вдоль оси OX с постоянной скоростью $v_{тр}$ (рис. 2). Маятник – жёсткий стержень (штанга) длиной L , к концу которого шарнирно прикреплен диск радиуса r_{bob} (центр совпадает с концом штанги). Препятствия (стволы обрабатываемых растений) – одинаковые малые круги радиуса r_{obs} , центры которых расположены на высоте y_{obs} через равные промежутки Δx по оси X . Угол θ зададим в виде функции пройденного пути внутри пролёта.

Координаты опорной точки P найдем согласно системе:

$$\begin{cases} x_p(t) = x_0 + v_{\text{тр}} t, \\ y_p(t) = \text{const}, \end{cases} \quad (1)$$

где x_p – абсцисса шарнира, м; x_0 – начальная абсцисса, м; $v_{\text{тр}}$ – скорость поступательного движения вправо, м/с; t – время, с; y_p – высота оси шарнира, м.

Проведем дискретизацию времени в соответствии с системой:

$$\begin{cases} t_i = i \Delta t, \\ i = 0, 1, \dots, N - 1, \\ N = \frac{t_{\text{total}}}{\Delta t} + 1, \end{cases} \quad (2)$$

где t_i – дискретное время, с; Δt – шаг по времени, с; t_{total} – длительность моделирования, с; N – наибольшее целое (целочисленные скобки) число шагов, шт.

Расставим препятствия (стволы обрабатываемых растений) в соответствии с системой:

$$\begin{cases} x_k = k \Delta x, \\ y_k = y_{\text{obs}}, \\ k \in Z, \end{cases} \quad (3)$$

где x_k – абсцисса центра k -го препятствия, м; Δx – шаг между препятствиями (шаг посадки), м; k – целочисленный индекс пролёта (принадлежит целым числам), шт.; y_{obs} – высота осей препятствий, м.

Рассматривая шарнир фрезы (точка B), можно заметить, что он движется как маятник, закрепленный на подвижной точке P . Тогда уравнение движения найдем из системы:

$$\begin{cases} x_b(t) = x_p(t) + L \sin \theta(t), \\ y_b(t) = y_p(t) - L \cos \theta(t), \end{cases} \quad (4)$$

где x_b, y_b – координаты центра рабочего органа, м; L – длина маятника (от P до B), м; $\theta(t)$ – угловое отклонение маятника (счёт от вертикали вниз, положительное – влево), рад.

При выводе из ряда рабочий орган не должен задевать растения, для этого необходимо определить их положения, увязав его с рабочим органом:

$$\begin{cases} k(t) = \frac{x_p(t)}{\Delta x}, \\ x_{\text{left}}(t) = k(t) \Delta x, \\ x_{\text{rel}}(t) = x_p(t) - x_{\text{left}}(t) \in [0, \Delta x), \end{cases} \quad (5)$$

где $k(t)$ – индекс пролёта, шт.; x_{left} – абсцисса левого препятствия текущего пролёта, м; x_{rel} – относительная позиция рабочего органа внутри пролёта, м.

При выходе из ряда можно выделить три фазы движения рабочего органа: фаза входа, фаза нижнего выстоя, фаза выхода. Фазы входа и выхода симметричны. Найдем длины участков фаз из системы:

$$\begin{cases} s_1 = \min\left(l_{\text{edge}}, \frac{1}{2}\Delta x\right), \\ s_2 = \max(0, \Delta x - 2s_1). \end{cases} \quad (6)$$

где s_1 – длина участков вход/выход (если $l_{\text{edge}} > \Delta x$ то берем $\frac{1}{2}\Delta x$), м; s_2 – длина участка на фазе нижнего выстоя, м; l_{edge} – заданная длина входа/выхода, м.

Для управления движением штока гидроцилиндра, который будет регулировать фазы работы, необходимо определить траекторию, по которой будет обкатываться фреза, с учетом длины фаз и скорости подачи. Ордината траектории на фазе нижнего выстоя постоянна, а у фазы входа и выхода переменна. Для того, чтобы оценить долю пройденного участка фазы входа и выхода, введем понятие прогресс u (0 – начало фазы, 1 – конец фазы) и определим его из системы:

$$\begin{cases} u(t) = \frac{x_{\text{rel}}(t)}{s_1}, \\ x_{\text{rel}}(t) \in [0, s_1], \\ \frac{du}{dt} = \frac{v}{s_1}, \end{cases} \quad (7)$$

где u – прогресс по входному/выходному участку; x_{rel} – локальная продольная координата вдоль участка, м; v – скорость поступательного движения вправо, м/с; s_1 – длина сглаживаемого участка на фазах входа и выхода, м.

Весовую траекторию, которая задаёт желаемый профиль угла $\theta(t)$, используя гиперболический тангенс, найдем по формуле:

$$S(u; k) = \frac{1}{2} \left[\tanh\left(K\left(u - \frac{1}{2}\right) + 1\right) \right], \quad u \in [0, 1], \quad (8)$$

где S – безразмерный вес; u – безразмерный прогресс; K – параметр резкости кривой.

Значения угла поворота маятника для фазы входа (от $+\theta_0$ к 0), нижнего выстоя (0-0) и фазы выхода (от 0 к $-\theta_0$) найдем из системы:

$$\begin{cases} \theta(t) = \theta_0(1 - S(u; K)), u = \frac{x_{\text{rel}}(t)}{s_1}, x_{\text{rel}} \in [0, s_1], \\ \theta(t) = 0, x_{\text{rel}} \in (s_1, s_1 + s_2], \\ \theta(t) = -\theta_0 S(u; K), u = \frac{x_{\text{rel}}(t) - (s_1 + s_2)}{s_1}, x_{\text{rel}} \in (s_1 + s_2, \Delta x), \end{cases} \quad (9)$$

где $\theta(t)$ – текущий угол поворота маятника, рад; θ_0 – амплитуда, рад.

Продифференцировав (9), получим:

$$\dot{\theta}(t) = \begin{cases} -\theta_0 \frac{dS}{du} \frac{v}{s_1}, x_{\text{rel}} \in [0, s_1] \text{ (вход)} \text{ или } x_{\text{rel}} \in (s_1 + s_2, \Delta x] \text{ (выход)}, \\ 0, x_{\text{rel}} \in [0, s_1] \text{ (вход)} \text{ или } x_{\text{rel}} \in (s_1 + s_2, \Delta x] \text{ (выход)}. \end{cases} \quad (10)$$

Продифференцировав (8) и используя гиперболический секанс скорости и ускорения, примем:

$$\begin{cases} \frac{dS}{du} = \frac{K}{2} \operatorname{sech}^2 \left(K \left(u - \frac{1}{2} \right) \right), \\ \frac{d^2S}{du^2} = -k^2 \operatorname{sech}^2 \left(K \left(u - \frac{1}{2} \right) \right) \tanh \left(K \left(u - \frac{1}{2} \right) \right). \end{cases} \quad (11)$$

Подставим в (10) систему (11) и получим угловую скорость и угловое ускорение рабочего органа на фазах выхода и входа:

$$\begin{cases} \dot{\theta}(t) = -\theta_0 \frac{dS}{du} \frac{v}{s_1} = -\theta_0 \cdot \frac{K}{2} \operatorname{sech}^2 \left(K \left(u - \frac{1}{2} \right) \right) \cdot \frac{v}{s_1}, \\ \ddot{\theta}(t) = -\theta_0 \frac{d^2S}{du^2} \left(\frac{v}{s_1} \right)^2 = \theta_0 K^2 \operatorname{sech}^2 \left(K \left(u - \frac{1}{2} \right) \right) \tanh \left(K \left(u - \frac{1}{2} \right) \right) \left(\frac{v}{s_1} \right)^2. \end{cases} \quad (12)$$

Для быстрой оценки требуемых пиковых угловых скоростей и ускорений используем систему:

$$\begin{cases} \left| \dot{\theta} \right|_{\max} \approx \theta_0 \frac{K}{2} \frac{v}{s_1}, \\ \left| \ddot{\theta} \right|_{\max} \approx 0.3849 \theta_0 K^2 \left(\frac{v}{s_1} \right)^2. \end{cases} \quad (13)$$

Полученная модель позволяет решить и обратную задачу, а именно определить параметр резкости кривой на основании допустимых значений угловой скорости и ускорения:

$$\begin{cases} K \leq \frac{2s_1 \omega_{max}}{\theta_0 v}, \\ K \leq \sqrt{\frac{\alpha_{max}}{0,3849\theta_0}} \frac{s_1}{v}, \end{cases} \quad (14)$$

где α_{max} – допустимое пиковое угловое ускорение маятника, рад/с².

Найдем рабочую зону, которая получается в результате работы орудия как нижняя огибающая следа касания идеального катящегося диска, как функцию $y_{rail}(x_g)$. В каждый момент времени t_j положения центра диска смещаются. Если проекция центра диска x_j по оси ОХ дальше, чем радиус диска r_{big} , значит, диск фрезы не покрывает вертикаль, и эти положения не учитываются. Данное условие запишем как:

$$|x_g - x_j| \leq r_{big}. \quad (15)$$

Используя уравнение окружности, получим:

$$(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 = r_{big}^2 \Rightarrow y = y_j \pm \sqrt{r_{big}^2 - (x - x_j)^2}, \quad (16)$$

где x_j, y_j – координаты центра диска в момент t_j (опорные точки, вокруг которых строятся диски радиуса r_{big}).

Подкоренное выражение в формуле (16) – это вертикальный отступ от центра диска до точки окружности для рассматриваемой абсциссы x_g .

Высоты точек касания снизу, как минимум из рассчитываемых в момент времени t_j и удовлетворяющих условию (15), найдем по следующей формуле:

$$y_{rail}(x_g) = \min_{j: |x_g - x_j| \leq r_{big}} \left[y_j - \sqrt{r_{big}^2 - (x_g - x_j)^2} \right], \quad (17)$$

где x_g – абсцисса, где необходимо узнать высоту касания, м; y_{rail} – высота касания. м.

Результаты исследований. Входные параметры для моделирования: плечо маятника $L = 0,3$ м; радиус ротора $r_{bob} = 0,3$ м; радиус ствола $r_{obs} = 0,05$ м; уровень осей стволов $y_{obs} = 0,05$ м; высота оси маятника $y_p = 0,4$ м; начальное положение рамы $x_0 = 0$ м; амплитуда угла поворота $\theta_0 = 90^\circ$; длина входа/выхода $l_{edge} = 0,6$ м; резкость разворота $K = 6$;

скорость подачи $v = 3,6$ км/ч; шаг между центрами стволов для первого опыта $\Delta x_{\text{obs}} = 1$ м, для второго опыта $\Delta x_{\text{obs}} = 2$ м.

На рис. 3 показаны фрагменты рабочей зоны, соответствующие времени моделирования 3,5 с для двух разных шагов посадки. Обозначения аналогичные, поэтому приведены только для случая шага посадки 2 м.

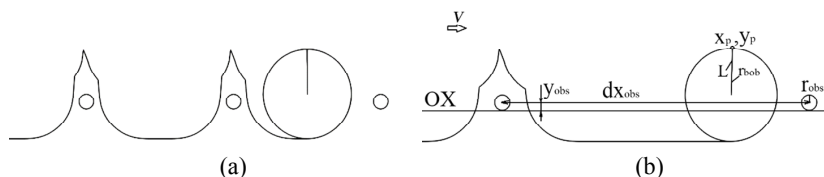


Рис. 3. Рабочая зона фрезы для $t = 3,5$ с: (а) шаг посадки – 1 м; (б) шаг посадки – 2 м

Fig. 3. Rotary cultivator working area for $t = 3.5$ sec: (a) the plant spacing is 1 m; (b) the plant spacing is 2 m

Из форм рабочей зоны следует, что для достижения минимальных необработанных огрехов в ряду необходимы движения маятника с амплитудой 90° , то есть суммарным углом поворота 180° . В этом случае диск будет ближе подходить к внутренней стороне растения, в то время как если бы угол составлял 90° , приходилось бы раньше выводить рабочий орган из области ухода.

Изменения угла поворота штанги фрезы показаны на рис. 4.

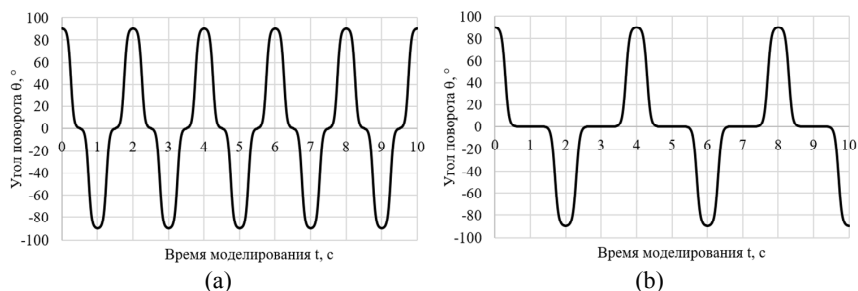


Рис. 4. Изменение угла поворота штанги фрезерного рабочего органа: (а) шаг посадки – 1 м; (б) шаг посадки – 2 м

Fig. 4. Changing the rod angle of rotation of the rotary cultivator: (a) the plant spacing is 1 m; (b) the plant spacing is 2 m

Изменение угловой скорости штанги фрезы показано на рис. 5.

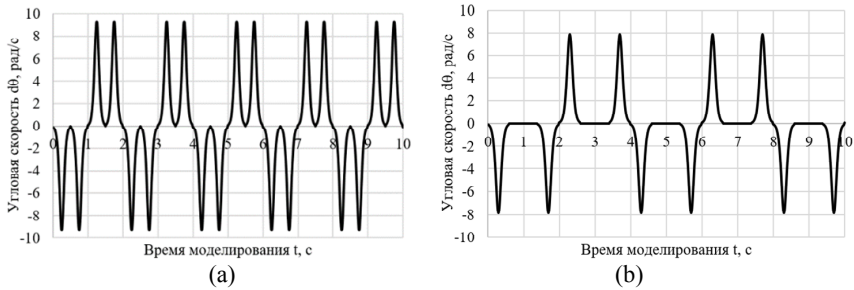


Рис. 5. Изменение угловой скорости поворота штанги фрезерного рабочего органа: (а) шаг посадки – 1 м; (б) шаг посадки – 2 м

Fig. 5. Changing the rod angular velocity of the rotary cultivator: (a) the plant spacing is 1 m; (b) the plant spacing is 2 m

Используя представленные зависимости, можно дать точный прогноз угла и скорости в любой момент времени, а, значит, быстро подобрать их для требуемых входных величин. Меняя шаг посадки, можно выяснить, как он влияет на скоростные режимы вращения фрезы и, соответственно, на ее производительность.

Выводы.

1. Разработанная математическая модель кинематики рабочего процесса почвообрабатывающего орудия с фрезерным рабочим органом может быть использована для дальнейших теоретических и экспериментальных исследований. При разработке техники для дополнительного ухода в рядах культур разработанная модель позволяет проводить виртуальный эксперимент над цифровым двойником орудия, что сокращает время разработки подобных технических образцов;

2. Составленная модель позволяет определить кинематику фрезы с учетом ее радиуса, скорости подачи, а также шага посаженных растений и может быть использована для оптимизации траекторий с целью снижения пиковых усилий в шарнирах конструкции;

3. При известном шаге посадки насаждений оператор может выбрать режим ухода, и орудие по известному заданному алгоритму будет осуществлять обработку почвы в приствольных зонах древесных растений с повышенной производительностью и качеством выполнения операции.

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00876, <https://rscf.ru/project/25-19-00876/>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Андержанова Н.Н. Конструктивные особенности сегментной фрезы для малогабаритной почвообрабатывающей техники // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства: мат. межд. науч.-практ. конф. Йошкар-Ола, 2023. С. 835-839.

Белосуев С.В., Камбулов С.И., Рыков В.Б., Туровский Б.В. Кинематика ротационных почвообрабатывающих машин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2023. №1 (69). С. 509-519.

Блохин В.Н., Случевский А.М., Орехова Г.В., Бритоусов А.В. К вопросу об оптимизации конструкции активных рабочих органов почвофрез с вертикальной осью вращения // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. №6 (64). С. 39-42.

Бычков В.В., Кадыкало Г.И., Шевкун В.А. Тенденции развития машин для обработки почвы в садах и ягодниках // Вестник Рязанского государственного агро-технологического университета им. П.А. Костычева. 2011. №2 (10). С. 59-63.

Винокуров В.Н., Силаев Г.В., Золотаревский А.А. Машины и механизмы лесного хозяйства и садово-паркового строительства. М.: Академия, 2004. 400 с.

Гладков А.Е. Анализ функциональных параметров ротационного рабочего органа почвообрабатывающей машины // Инженерные технологии в сельском и лесном хозяйстве: мат. Всерос. нац. науч.-практ. конф. Тюмень, 2020. С. 23-27.

Дручинин Д.Ю., Гнусов М.А., Усыков А.В., Медведев Д.Ю. Анализ конструктивных и технологических особенностей орудий для приствольной обработки почвы // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: мат. XXI межд. науч.-тех. конф. Вологда, 2023. С. 173-178.

Филиппов Р.А., Хорт Д.О., Смирнов И.Г. Отклоняемая фрезерная секция для обработки почвы в приствольных зонах многолетних насаждений // Таврический вестник аграрной науки. 2018а. №4 (16). С. 166-175.

Филиппов Р.А., Хорт Д.О., Шевкун В.А. Обоснование параметров выносной фрезерной секции для обработки почвы в приствольных зонах плодовых насаждений // Энергетика і автоматика. 2018b. №2 (36). С. 66-78. DOI: 10.31548/energiya2018.02.066.

Guglev D. Defining the Critical Kinematic Parameters of Rotary Harrow with Vertical Axis of Rotation // Agricultural science and technology. 2011. Vol. 3, no. 3. P. 237–239.

Tolvaly-Rosca F., Pásztor J., Forgó Z. Kinematic and Dynamic Modeling of the Rotary Harrow // *Acta Universitatis Sapientiae, Electrical and Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 13, iss. 1. P. 25–38. DOI: 10.2478/auseme-2021-0003.

References

Anderzhanova N.N. Design features of a segment milling cutter for small-sized tillage machinery. *Current issues of improving the technology of production and processing of agricultural products: mat. of int. sci.-pract. conf. Yoshkar-Ola, 2023*, pp. 835-839. (In Russ.)

Belousov S.V., Kambulov S.I., Rykov V.B., Turovsky B.V. Kinematics of rotary tillage machines. *Proceedings of the Nizhnevolszhsky agrouniversity complex: Science and higher professional education, 2023*, no. 1 (69), pp. 509-519. (In Russ.)

Blokhin V.N., Sluchevsky A.M., Orekhova G.V., Britousov A.V. To the question of optimizing the design of dynamic tillage tool with a vertical axis of rotation. *Bulletin of the Bryansk State Agricultural Academy, 2017*, no. 6 (64), pp. 39-42. (In Russ.)

Bychkov V.V., Kadykalo G.I., Shevkun V.A. Tendencies of development of machines for soil tillage in the gardens and berry- fields. *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, 2011*, no. 2 (10), pp. 59-63. (In Russ.)

Druchinin D.Yu., Gnusov M.A., Usikov A.V., Medvedev D.Yu. Analysis of the design and technological features of tools for trunk tillage. *Actual problems of the development of the forest complex: mat. of the XXI int. sci.-tech. conf.. Vologda, 2023*, pp. 173-178. (In Russ.)

Filippov R.A., Khort D.O., Smirnov I.G. Remote milling unit for the soil cultivation in the neartree-trunk zone of fruit plants. *Tavrichesky Bulletin of Agrarian Science, 2018a*, no. 4 (16), pp. 166-175. (In Russ.)

Filippov R.A., Khort D.O., Shevkun V.A. Justification parameters of portable milling section for soil processing in the areas fruit plants. *Energy and automation, 2018b*, no. 2 (36), pp. 66-78. (In Russ.)

Gladkov A.E. Analysis of functional parameters of the rotary working body of a tillage machine. *Engineering technologies in agriculture and forestry: mat. of the All-Russ. nat. sci.-pract. conf. Tyumen, 2020*, pp. 23-27. (In Russ.)

Guglev D. Defining the Critical Kinematic Parameters of Rotary Harrow with Vertical Axis of Rotation. *Agricultural science and technology, 2011*, vol. 3, no. 3, pp. 237–239.

Tolvaly-Rosca F., Pásztor J., Forgó Z. Kinematic and Dynamic Modeling of the Rotary Harrow. *Acta Universitatis Sapientiae, Electrical and Mechanical Engineering, 2021*, vol. 13, iss. 1, pp. 25–38. DOI: 10.2478/auseme-2021-0003.

Vinokurov V.N., Silaev G.V., Zolotarevsky A.A. Machines and mechanisms of forestry and garden and park construction. Moscow: Akademiya, 2004. 400 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 03.09.2025

Дручинин Д.Ю., Бухтояров Л.Д., Гнусов М.А., Лысыч М.Н., Фатхулин В.Р. Исследование кинематики фрезерного рабочего органа орудия для ухода за насаждениями в рядах деревьев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 258. С. 281–296. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.258.281-296

При выращивании насаждений немаловажным фактором их успешного роста и развития является дополнительная обработка почвы, заключающаяся в ее рыхлении и удалении сорной растительности. В лесном хозяйстве данная технологическая операция выполняется в основном в междурядьях насаждений пропашными культиваторами или методом седлания рядка с оставлением защитной зоны специальными лесными орудиями. Непосредственно в ряду лесные культуры освещаются вручную при помощи мотокусторезов и триммеров, что непроизводительно. По аналогии с садовыми орудиями авторами разработана конструкция орудия для обработки почвы в рядах древесных насаждений, оснащенного фрезерным рабочим органом. Целью работы является составление математической модели движения вертикально вращающейся фрезы с дугообразным уводом из ряда в процессе обработки почвы орудием многолетних насаждений для оценки кинематических параметров рабочего процесса. В разработанной модели учтено, что орудие движется поступательно, а кривошип, на котором установлена фреза, работает как кулиса, то есть движется по полудуге. Определение положения обрабатываемых растений увязано с рабочим органом, так как при выводе из ряда фреза не должна задевать стволы. В качестве примера использования модели показан результат моделирования фрагментов рабочей зоны для двух разных шагов посадки растений – 1 м и 2 м. Представленное математическое описание кинематики рабочего процесса почвообрабатывающего орудия с фрезерным рабочим органом может быть использовано для дальнейших теоретических и экспериментальных исследований работы данного вида техники и сокращает время разработки серийных технических образцов.

Ключевые слова: лесное хозяйство, дополнительная обработка почвы, почвообрабатывающая фреза, кинематика, траектория, приствольная зона, шаг посадки.

Druchinin D.Yu., Bukhtoyarov L.D., Gnuvov M.A., Lysych M.N., Fatkhulin V.R. Kinematic analysis of the milling working part of an implement for tending tree rows in plantations. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoj Akademii*, 2026, iss. 258, pp. 281–296 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.258.281-296

When growing plantings, an important factor in their successful growth and development is additional tillage, which consists in loosening and removing weedage.

In forestry, this technological operation is performed mainly in the spacing of plantations by inter-row cultivators or by saddling a row with leaving a protective zone with special forest tools. Directly in the row, the forest crops are clarified manually with the help of motorcycle cutters and trimmers, which is not productive. By analogy with garden tools, the authors have designed a machine for cultivating the soil in rows of tree plantation, equipped with a milling working part. The purpose of the work is to compile a mathematical model of the movement of a vertically rotating milling cutter with an arcuate withdrawal from a row during tillage with a perennial plantings tool to evaluate the kinematic parameters of the work process. The developed model takes into account that the gun moves progressively, and the crank on which the milling cutter is mounted works like a curtain rod, that is, it moves in a half-arc. The determination of the position of the treated plants is linked to the working part, as when moving out of the row, the milling cutter should not touch the stipes. As an example of using the model, the result of modeling fragments of a work area for two different plant spacing is shown – 1 m and 2 m. The presented mathematical formulation of the kinematics of a tillage tool with a milling working part work process of can be used for further theoretical and experimental studies of the operation of this type of equipment and reduces the development time of serial technical samples.

Key words: forestry, aftertreatment tillage, rotary cultivator, kinematics, trajectory, trunk area, plant spacing.

ДРУЧИНИН Денис Юрьевич – заведующий кафедрой механизации лесного хозяйства и проектирования машин Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 2482-8478.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: druchinin.denis@rambler.ru

DRUCHININ Denis Yu. – PhD (Technical), Head of the Department of Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Associate Professor. SPIN-code: 2482-8478.

394087. Timiryazeva str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: druchinin.denis@rambler.ru

БУХТОЯРОВ Леонид Дмитриевич – доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0002-7428-0821. SPIN-код: 9081-6485. WoS ResearcherID: AAO-5129-2020. Scopus AuthorID: 57207453672.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: vgltmlx@yandex.ru

BUKHTOYAROV Leonid D. – PhD (Technical), Associate Professor, Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. ORCID: 0000-0002-7428-0821. SPIN-code: 9081-6485. WoS ResearcherID: AAO-5129-2020. Scopus AuthorID: 57207453672.

394087. Timiryazeva str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: vglta-mlx@yandex.ru

ГНУСОВ Максим Александрович – доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и правовых отношений Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, доктор технических наук. SPIN-код: 6242-1723.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: mgnusov@yandex.ru

GNUSOV Maksim A. – DSc (Technical), Associate Professor, Department of Life Safety and Legal Relations, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, SPIN-code: 6242-1723.

394087. Timiryazeva str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: mgnusov@yandex.ru

ЛЫСЫЧ Михаил Николаевич – доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0002-3764-3873. SPIN-код: 3555-2111. WoS ResearcherID: N-3089-2016. Scopus AuthorID: 57207472657.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: miklynea@yandex.ru

LYSYCH Mikhail N. – PhD (Technical), Associate Professor, Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. ORCID: 0000-0002-3764-3873. SPIN-code: 3555-2111. WoS ResearcherID: N-3089-2016. Scopus AuthorID: 57207472657.

394087. Timiryazeva str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: miklynea@yandex.ru

ФАТХУЛИН Вадим Русланович – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова. SPIN-код: 4637-5135.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: injener25776@mail.ru

FATKHULIN Vadim R. – PhD student, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. SPIN-code: 4637-5135.

394087. Timiryazeva str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: injener25776@mail.ru