УДК 631.317

DOI: 10.35887/2305-2538-2021-1-5-11

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РОТОРА И РЕЖИМА РАБОТЫ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ФРЕЗЫ
НА БОКОВОЙ ВЫНОС ПОЧВЫ**¹**Ожерельев Виктор Николаевич**¹ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет»

Реферат. Рассмотрен процесс взаимодействия L-образных наружу отогнутых ножей с почвой при ее обработке вертикальными фрезами. Для уменьшения энергоемкости процесса принято наклонять ось вращения ротора вперед по ходу агрегата, при этом наблюдается отброс почвы в сторону направления вращения ротора. Позитивным такой процесс является при работе на плантациях ягодных культур с наличием характерных почвенных валов вдоль оснований кустов. На выровненных поверхностях междурядий процесс негативный, поэтому выявляли его основные закономерности в поисках способа влияния на результат. Приведены результаты экспериментальных исследований, в которых оценивалась степень поперечного сдвига центра масс поперечного сечения обработанной полосы и ее зависимость от частоты вращения ротора. В качестве критерия оценки использовано расстояние между горизонтальными координатами центра масс поперечного сечения обработанной полосы до прохода фрезы и после него. Установлено, что с ростом частоты вращения ротора поперечный сдвиг центра масс обработанной полосы почвы увеличивается. Получена математическая модель процесса фонтанирования почвы. Его условием является превышение вертикальным ускорением элементарного массива почвы величины $168,5 \text{ с}^{-1}$. При этом под воздействием подрезающего лезвия ножа элементарный массив почвы скалывается под углом около 45^0 и по инерции продолжает свое движение как тело, брошенное под углом к горизонту. Установлено, что при диаметре ротора 0,8 м критической с точки зрения фонтанирования почвы является частота вращения, превышающая 179 мин^{-1} . При частоте вращения ротора 140 мин^{-1} расчетные значения величины поперечного сдвига почвы всего на 10% отличаются от экспериментальных результатов. Это свидетельствует об адекватности принятой модели взаимодействия ножа фрезы с почвой.

Ключевые слова: обработка почва, вертикальная фреза, наклон оси вращения, поперечный отброс почвы, критическая частота вращения ротора.

**INFLUENCE OF ROTOR PARAMETERS AND OPERATING MODE
OF VERTICAL TILLAGE CUTTER ON SIDE DISCARD OF SOIL**¹**Ozherelev Viktor**¹FSBEI HE "Bryansk State Agrarian University"

Abstract. The process of interaction of L-shaped outwardly bent knives with the soil during its processing with vertical mills is considered. It is customary to tilt the axis of rotation of the rotor forward along the course of the unit to reduce the energy consumption of the process, while the soil is thrown away in the direction of the rotor rotation. Such a process is positive when working on plantations of berry crops with the presence of characteristic soil shafts along the bases of the bushes. The process is negative on the leveled surfaces of the row spacings, therefore, its main patterns were identified in search of a way to influence the result. The results of experimental studies are presented, in which the degree of transverse shift of the center of mass of the cross-section of the processed strip and its dependence on the rotor speed were estimated. The distance between the horizontal coordinates of the center of mass of the cross-section of the processed strip before and after the cutter passage was used as an assessment criterion. It was found that with an increase in the rotor speed, the transverse shift of the center of mass of the treated strip of soil increases. A mathematical model of the soil flowing process is obtained. Its condition is that the vertical acceleration of the elementary soil mass exceeds the value of 168.5 s^{-1} . At the same time, under the influence of the cutting blade of the knife, the elementary soil mass is chipped off at an angle of about 45^0 and by inertia continues its movement as a body thrown at an angle to the

horizon. It has been established that with a rotor diameter of 0.8 m, the critical from the point of view of soil flowing is a rotation frequency exceeding 179 min⁻¹. The calculated values of the transverse soil displacement at a rotor speed of 140 min⁻¹ differ by only 10% from the experimental results. This testifies to the adequacy of the adopted model of interaction of the cutter blade with the soil.

Keywords: tillage, vertical tillage cutter, tilt of the axis of rotation, lateral soil discard, critical rotor speed.

Введение. Ретроспектива практического использования вертикальных фрез свидетельствует о том, что в течение последних сорока лет для них сформировалась ниша в отечественном ягодоводстве [1, 2]. Отчасти это обусловлено тем, что вертикально-ротационные рабочие органы наиболее приспособлены к удалению почвенных валов, образующихся вдоль оснований кустов вследствие многолетней обработки междурядий ягодных кустарников дисковыми боронами [3, 4]. Кроме того, одновременно с обработкой почвы и удалением сорняков за счет ограничения ширины ряда при обработке осуществляется такая важная технологическая операция, как нормировка густоты стеблестоя малины [5, 6].

Следует иметь в виду, что на начальном этапе вертикально-ротационные машины рассматривались в качестве ротационных борон, применявшихся для подготовки почвы под посев [7, 8]. В таком же качестве они, как правило, используются во многих странах. Адаптация вертикально-ротационных машин к операциям ухода за многолетними культурами потребовала пересмотреть некоторые установившиеся представления об их конструкции и режимах работы. В частности, были предприняты попытки уменьшить энергоемкость процесса [9, 10]. С этой целью были испытаны несколько вариантов машин и типов их ножей. При этом наименее энергоемким оказался вариант снабжения ротора *L*-образными наружу отогнутыми ножами и наклоном оси его вращения вперед по ходу агрегата.

Как показали наши исследования, в отличие от использования машины в режиме ротационной бороны, когда предъявляются определенные требования к стабильности глубины обработки, при работе в прикустовой зоне многолетних насаждений такое условие не актуально. Более того, целесообразно, чтобы поперечный профиль дна борозды углублялся по мере удаления от основания куста, следуя за наклоном скелетных корней ягодных растений [11]. Такой характер поперечного профиля дна борозды обеспечивается наклоном вперед оси вращения ротора, что и было принято за основу при разработке агрегата по уходу за плантацией малины [12].

Как правило, конструктивное решение, улучшающее определенные параметры технического объекта, может вызвать побочные проблемы, которые нельзя игнорировать. Так, наклон вперед оси вращения ротора позволил практически в два раза уменьшить крутящий момент, необходимый для его привода [13, 14]. Однако при этом возникло характерное перераспределение части почвы в поперечной плоскости в сторону вращения ротора. При использовании машины для ликвидации прикустовых почвенных валов указанное явление является позитивным. Если же работать на вновь заложной плантации с выровненным поперечным профилем поверхности междурядья, то эффект следует оценить, как негативный. Для того, чтобы осознанно управлять поперечным переносом почвы ротором фрезы целесообразно установить закономерности, характерные для указанного процесса и выявить связь между степенью переноса и конструктивно-кинематическими параметрами машины.

Материалы и методы. Объектом исследования является вертикально-ротационный рабочий орган, ось вращения 8 которого установлена под углом β_n к вертикали (рисунок 1а). Ротор снабжен *L*-образными наружу отогнутыми ножами (стойка 9 и подрезающее лезвие 10). Предметом исследования является процесс взаимодействия ножа, особенно его подрезающего лезвия 10 с почвой. Цель исследования заключается в выявлении связи между параметрами процесса и степенью поперечного переноса почвы. Поскольку после обработки полосы почвы шириной, равной диаметру ротора *D* (рисунок 1б) происходит ее частичный перенос в сторону направления вращения ротора, то оценить степень этого поперечного сдвига обработанного пласта наиболее корректно по величине ΔX , характеризующей расстояние по горизонтали между центром тяжести 6 исходного (необработанного) поперечного сечения и его новым положением 7 после разрыхления.

1 – дно борозды; 2 – поверхность до обработки; 3 – поверхность после обработки;
4 – зона изъятия почвы; 5 – зона отложения почвы; 6, 7 – центр масс поперечного профиля до
обработки и после нее, соответственно; 8 – ось вращения ротора; 9 – стойка L-образного наружу
отогнутого ножа; 10 – подрезающее лезвие ножа; 11 – полоса обработанной почвы

Рисунок 1 – Продольный и поперечный профили полосы почвы, обработанной ротором с наклоном вперед оси его вращения на угол β_n :

Опыт проводился следующим образом. На поверхности междурядья смородины случайным образом выбирался выровненный участок длиной 10 – 12 метров, на котором устанавливали штыри с горизонтальными полками для укладки на них в поперечном направлении мерной линейки длиной три метра. Ее выравнивали по уровню и через каждые 50 мм измеряли расстояние до поверхности необработанной почвы. В результате получали исходный поперечный профиль 2 поверхности междурядья (рисунок 1б). Передача, на которой перемещался трактор, и передаточное отношение привода фрезы были подобраны так, чтобы подача на один нож (в направлении V_n) соответствовала ширине захвата подрезающего лезвия 10 (рисунок 1а). Частота вращения ротора n имела три уровня варьирования – 100, 120 и 140 мин^{-1} . После прохода агрегата мерную линейку возвращали в исходное положение, после чего измеряли параметры сначала обработанной поверхности 3, а затем (после удаления разрыхленной почвы) – дна борозды 1 (рисунок 1б).

Опыты проводили на тяжелой суглинистой почве, влажность которой варьировалась от 15 до 30 %, а твердость – от 1,8 до 2 МПа. Экспериментальная установка имела следующие параметры. Диаметр D ротора по концам ножей – 0,8 м, глубина обработки h_{max} – 0,12 м и угол наклона оси вращения β_n – 17° . Ширина захвата подрезающего лезвия 10 составляла 0,11 м. На каждом уровне варьирования независимой переменной n опыт был проведен в десятикратной повторности. Результаты обработаны в программе Excel.

Результаты и их обсуждение. При обработке полосы почвы шириной D продольный профиль дна борозды в зоне максимальной глубины h_{max} приобретает ярко выраженную гребнистость (рисунок 1а). При этом часть поверхности раздела между монолитом и стружкой 11 образуется в результате подрезания горизонтальным лезвием 10 L-образного наружу отогнутого ножа, тогда как ее большая часть формируется вследствие скола почвы под углом по направлению к поверхности.

Поперечный профиль дна борозды имеет форму, близкую к дугообразной (рисунок 1б). При этом центр масс поперечного сечения вследствие воздействия на почву L-образных наружу отогнутых ножей смещается в сторону вращения ротора на величину ΔX . Обработка результатов опытов позволила получить численное значение величины поперечного смещения профиля и ее зависимость от частоты вращения ротора (рисунок 2).

В принципе, результат ожидаемый. При увеличении частоты вращения ротора величина поперечного смещения центра масс поперечного сечения обработанной полосы почвы возрастает.

Рисунок 2 – Зависимость величины поперечного смещения центра масс поперечного профиля полосы почвы, обработанной вертикальной фрезой с наклоном оси вращения ротора вперед по ходу движения агрегата на угол 17°

Это обусловлено тем, что рост частоты вращения увеличивает импульс кинетической энергии, передаваемый ножами частицам почвы. Что касается характера зависимости, то существенной разницы между линейным и полиномиальным трендами не установлено. В дальнейшем имеет смысл выполнить уточняющие исследования с соответствующим целевым планированием экспериментов.

Заметный резерв в процессе совершенствования почвообрабатывающих машин выявляется в результате углубления представлений о характере взаимодействия рабочих органов с почвой. Это относится и к рассматриваемому случаю вертикальной фрезы. Процесс этот достаточно сложный, поэтому рассмотрим его упрощенную модель, введя ряд приемлемых в таком случае упрощений и допущений (рисунок 3).

Рисунок 3 – Схема взаимодействия подрезающего лезвия L-образного наружу отогнутого ножа фрезы с почвой

Будем считать, что от точки E до точки D происходит смятие почвы, которое, вследствие скоротечности процесса, не успевает передаться ее основному массиву. При перемещении от точки D до точки A происходит передача импульса элементарному почвенному массиву с поперечным сечением $ABCD$, которое можно условно принять за параллелограмм. Поскольку при взаимодействии с лезвием 10 массив $ABCD$ поднимается на величину Δh , приобретая вертикальную скорость V_v , то условие динамического равновесия в проекции на вертикальную ось y , приведенную к плоскости скола CD , можно выразить следующим образом

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} = P + F_{ск} \cdot \cos(\alpha + \varphi) \quad (1)$$

где m – масса элементарного массива почвы, кг; $P = mg$ – вес почвенного массива, Н; $F_{ск}$ – сила сопротивления скалыванию массива по направлению CD , Н; $\alpha + \varphi$ – фактический угол скола, полученный по результатам замеров продольного профиля, (принимая равным 45°).

Таким образом, для гарантированного начала процесса фонтанирования почвы запаса кинетической энергии, сообщенной ее элементарному массиву, должно быть достаточно как для преодоления силы тяжести, так и вертикальной составляющей силы сопротивления почвы скалыванию ($F_{ск}$). Для упрощения ситуации и перехода к численным методам расчета примем, что толщина элементарного массива почвы (в поперечном плоскости рисунка направлении) единичная. Тогда указанную силу можно выразить через массу, объективные характеристики почвы и лезвия ножа следующим образом

$$F_{ск} = \frac{H \cdot \tau}{\cos(\alpha + \varphi)} = \frac{m \cdot \tau}{b \cdot \rho \cdot \cos(\alpha + \varphi)} \quad (2)$$

где $H = h_{max}$ – максимальная величина заглубления подрезающего лезвия ножа; $\tau = 10$ кПа – предел прочности почвы на скалывание (касательные напряжения); $b = 0,036$ м – ширина активной части подрезающего лезвия ножа; $\rho = 1800$ кг/м³ – удельная масса почвы.

После подстановки выражения (2) в (1) условие фонтанирования почвы принимает следующий вид

$$a_\phi = g + \frac{\tau}{b \cdot \rho} \quad (3)$$

При принятых значениях исходных параметров $a_\phi = 168,5$ с⁻¹. Если принять равномерное нарастание скорости движения элементарного массива почвы с постоянным ускорением, то окружная скорость рассматриваемого сечения подрезающего лезвия, при которой фонтанирование почвы неизбежно, определяется формулой

$$V_\phi = \sqrt{\frac{a_\phi \cdot b}{tg \alpha}} = 7,5 \text{ м/с} \quad (4)$$

где $\alpha = 6^\circ$ – минимальное значение угла наклона поперечного сечения подрезающего лезвия ножа к горизонту.

Если указанные параметры относятся к наиболее удаленной точке ротора, то фонтанирование почвы неизбежно при частоте его вращения $n_\phi > 179$ мин⁻¹. При варьировании в наших опытах частоты вращения ротора в пределах 100 – 140 мин⁻¹ процесс взаимодействия ножей с почвой только приближался к критическому. Тем не менее, и в этом случае поперечный перенос почвы неизбежен, хотя и в значительно меньшей степени.

Это обусловлено тем, что в результате перемещения по лезвию из точки D в точку A и подъема в связи с этим на высоту Δh , элементарный массив почвы неизбежно приобретает вертикальную скорость V_v . При принятой в опытах максимальной частоте вращения ротора, равной 140 мин⁻¹, и окружной скорости подрезающего лезвия ножа $V_0 = 5,86$ м/с, $V_v = 0,615$ м/с. Поскольку инерция вертикального движения не может погаситься мгновенно, то дальнейшее

перемещение элементарного массива почвы возможно только вдоль линии скола CD (рисунок 3), в связи с чем будет корректно считать, что он переместился из точки m в точку m_1 на расстояние ΔX , как тело, брошенное под углом 45° к горизонту. Тогда величина горизонтального перемещения может быть найдена следующим образом

$$\Delta X = \frac{2V_a^2}{g} = 0,077 \text{ м}$$

Заключение. Сопоставление расчетной величины поперечного смещения элементарного массива почвы под действием ножей ротора, вращающегося вокруг оси, наклоненной на угол $\beta_n = 17^\circ$, с экспериментальными данными свидетельствует о том, что разница находится на уровне 10 %. С учетом степени варьирования внешних условий (твердости, влажности и засоренности почвы), можно считать, что указанные различия не существенны и принятая теоретическая гипотеза взаимодействия ножа фрезы с почвой удовлетворительно объясняет характер процесса.

Список литературы

1. Блохин В.Н. Исследование процесса и рабочего органа для ухода за межкустовой зоной на ягодниках: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства. – М. – 1993. – 22 с.
2. А.с. № 1724040 СССР, МКИ А01В 59/04, А01D 46/28. Агрегат для ухода за высокостебельными культурами / Блохин В.Н., Ожерельев В.Н., Цымбал А.А. - № 4654677/30 – 15; заявл. 24.02.89; опубл. 07.04.92, Бюл. № 13. – 4 с.
3. Бартенев В.Д., С.Н. Хабаров. Комплексная механизация возделывания насаждений ягодников и облепихи // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2011. – № 7 (81). – С. 96 – 98.
4. Никитин, В.В. Улучшение качества обработки междурядий ягодных кустарников в условиях суглинистых почв повышенной влажности путем совершенствования конструктивно-режимных параметров дисковой бороны: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства. – Брянск. – 2009. – 165 с.
5. Ожерельев В.Н. Технологические процессы и средства механизации производства ягод малины: дисс. ... докт. с.-х. наук: 05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства. – Брянск. – 2001. – 312 с.
6. Ожерельева М.В. Совершенствование технологии возделывания малины в условиях средней полосы России: дисс. ... канд. с.-х. наук: 06.01.07 – Защита растений. – Брянск. – 2001. – 145 с.
7. Бычков В.В. Экспериментально-теоретическое обоснование параметров вертикально-ротационных рабочих органов для обработки тяжелых почв: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства. – М. – 1982. – 158 с.
8. Инакян С.А. Механико-технологическое обоснование параметров вертикально-ротационной почвообрабатывающей машины: дис. ... канд. техн. наук: 05.06.01 – Науки о земле. – М. – 1982. – 195 с.
9. Мостовский В.Б. Исследование процесса обработки приствольных полос в интенсивных садах вертикальными фрезами и обоснование типов и параметров их рабочих органов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства. – Киев. – 1980. – 22 с.
10. Чудак С.В. Исследование фрезы с вертикальным валом вращения // Механизация работ в виноградарстве и садоводстве. – Кишинев. – 1979. – С. 159 – 174.
11. Ярославцев Е.И. Малина. – М.: Колос. – 1979. – 159 с.
12. Патент РФ № 2466521 МПК⁷ А01В 39/16, 33/06. Ротационное почвообрабатывающее орудие / В.Н. Ожерельев, Н.В. Ожерельева, М.В. Ожерельева – Опубл. 20.11.12, Бюл. №32.
13. Ожерельев В.Н. Исследование и конструирование фрезерных машин: монография – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ. – 2019. – 196 с.

14. Ожерельев В.Н. Обоснование способа выглубления рабочих органов вертикально-фрезерного культиватора // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1987. – № 3. – С. 53 – 54.

References

1. Blohin V.N. Issledovanie processa i rabocheho organa dlja uhoda za mezhkustovoj zonoj na jagodnikah: Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.20.01 – Tehnologii i sredstva mehanizacii sel'skogo hozjajstva. – M. – 1993. – 22 s.

2. A.s. № 1724040 SSSR, MKI A01B 59/04, A01D 46/28. Agregat dlja uhoda za vysokostebel'nyimi kul'turami / Blohin V.N., Ozherel'ev V.N., Cymbal A.A. - № 4654677/30 – 15; zajavl. 24.02.89; opubl. 07.04.92, Bjul. № 13. – 4 s.

3. Bartenev V.D., S.N. Habarov. Kompleksnaja mehanizacija vozdeľvanija nasazhdenij jagodnikov i oblepihi // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2011. – № 7 (81). – S. 96 – 98.

4. Nikitin, V.V. Uluchshenie kachestva obrabotki mezhdurjadij jagodnyh kustarnikov v uslovijah suglinistykh pochv povyshennoj vlazhnosti putem sovershenstvovanija konstruktivno-rezhimnykh parametrov diskovoj borony: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.20.01 – Tehnologii i sredstva mehanizacii sel'skogo hozjajstva. – Brjansk. – 2009. – 165 s.

5. Ozherel'ev V.N. Tehnologicheskie processy i sredstva mehanizacii proizvodstva jagod maliny: diss. ... dokt. s.-h. nauk: 05.20.01 – Tehnologii i sredstva mehanizacii sel'skogo hozjajstva. – Brjansk. – 2001. – 312 s.

6. Ozherel'eva M.V. Sovershenstvovanie tehnologij vozdeľvanija maliny v uslovijah srednej polosy Rossii: diss. ... kand. s.-h. nauk: 06.01.07 – Zashhita rastenij. – Brjansk. – 2001. – 145 s.

7. Bychkov V.V. Jeksperimental'no-teoreticheskoe obosnovanie parametrov vertikal'no-rotacionnykh rabochnykh organov dlja obrabotki tjazhelykh pochv: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.20.01 – Tehnologii i sredstva mehanizacii sel'skogo hozjajstva. – M. – 1982. – 158 s.

8. Inakjan S.A. Mehaniko-tehnologicheskoe obosnovanie parametrov vertikal'no-rotacionnoj pochvoobrabatyvajushhej mashiny: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.06.01 – Nauki o zemle. – M. – 1982. – 195 s.

9. Mostovskij V.B. Issledovanie processa obrabotki pristvol'nykh polos v intensivnykh sadah vertikal'nymi frezami i obosnovanie tipov i parametrov ih rabochnykh organov: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.20.01 – Tehnologii i sredstva mehanizacii sel'skogo hozjajstva. – Kiev. – 1980. – 22 s.

10. Chudak S.V. Issledovanie frezy s vertikal'nym valom vrashhenija // Mehanizacija rabot v vinogradarstve i sadovodstve. – Kishinev. – 1979. – S. 159 – 174.

11. Jaroslavcev E.I. Malina. – M.: Kolos. – 1979. – 159 s.

12. Patent RF № 2466521 MPK7 A01B 39/16, 33/06. Rotacionnoe pochvoobrabatyvajushhee orudie / V.N. Ozherel'ev, N.V. Ozherel'eva, M.V. Ozherel'eva – Opubl. 20.11.12, Bjul. №32.

13. Ozherel'ev V.N. Issledovanie i konstruirovaniye freznykh mashin: monografija – Brjansk: Izd-vo Brjanskij GAU. – 2019. – 196 s.

14. Ozherel'ev V.N. Obosnovanie sposoba vyglublennija rabochnykh organov vertikal'no-frezernogo kul'tivatora // Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva. – 1987. – № 3. – S. 53 – 54.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Ожерельев Виктор Николаевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный аграрный университет», Россия, г. Брянск, e-mail: vicoz@bk.ru.

Author credentials

Affiliations

Ozherelyev Victor – Full Doctor of Agricultural Sciences, Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Bryansk State Agrarian University”, Russia, Bryansk, e-mail: vicoz@bk.ru.

Поступила в редакцию (Received): 28.12.2020 Принята к публикации (Accepted): 09.02.2021