

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ГОРИЗОНТАЛЬНО  
ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ФРЕЗЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ НА ЕЕ ПРИВОД**

**В.Н. Кондратьев**, доктор технических наук, профессор

**Н.Г. Райкевич**, кандидат технических наук

РУП «Институт мелиорации»

**Ключевые слова:** технология, планировка, рыхление откосов каналов, фреза, оборудование, почвогрунт, мелиорация

**Введение**

Повышение производительности труда и снижение трудовых затрат возможно за счет использования более эффективных отечественных и зарубежных технологий производства работ, создания и внедрения новых высокопроизводительных конструкций машин и механизмов. Для интенсификации ремонта и восстановления откосов каналов и других земляных сооружений необходимо усовершенствование специального планировщика-рыхлителя активного действия. Это позволит своевременно проводить мелкий ремонт откосов без выброса грунта на берму канала перед перезалужением с повторным использованием сохранившейся корневой системы дернины. Остатки корневищ дернины повышают противозерозионную устойчивость откосов до всходов семян трав. Кроме того, из корневищ развиваются новые побеги растений, что позволяет снизить норму посева семян.

**Результаты и обсуждение**

В объем работ по подготовке откосов к засеву трав входят рыхление и укатка верхнего слоя грунта с террасированием поверхности, предупреждающим эрозию почвы во время нанесения гидросмеси на откосы, обеспечение мелкокомковатой структуры верхнего слоя почвы на откосах с наибольшим количеством комочков размером от 0,25 до 10 мм [1] и  $K=65-75\%$  при глубине рыхления до  $100 \div 150$  мм.

Для оценки степени крошения верхнего слоя грунта используем коэффициент [1]

$$K = \frac{P_1}{P} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $K$  – показатель рыхлящей способности фрезы с вертикальными режущими элементами;

$P_1$  – масса фракции размером  $0,25 \div 10$  мм;

$P$  – общая масса взятой пробы вдоль полосы рыхления.

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n y_{k_i}}{n} - y_0; \quad (2) \quad x = \frac{\sum_{i=1}^n x_{k_i}}{n} - x_0, \quad (3)$$

Качество рыхления почвы с достаточной достоверностью оценивается так называемыми показателями перемещения почвы в поперечном и продольном направлениях [1]:

где  $y$  – среднее арифметическое поперечное смещение частиц, мм;

$y_{k_i}$  – конечные поперечные координаты частиц верхнего ряда, мм;

$n$  – число частиц верхнего ряда;

$y_0$  – координата края полосы рыхления одной фрезой;

$x$  – среднее арифметическое продольное смещение частиц, мм;

$x_{k_i}$  – конечные продольные координаты частиц верхнего слоя, мм;

$x_0$  – начальная продольная координата частиц, мм.

Коэффициент деформации почвенных слоев  $K_{г.д}$ , показывающий, во сколько раз увеличивается в горизонтальной плоскости расстояние между частицами верхнего слоя почвы, найдем из выражения [2]:

$$K_{г.д} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{x_{k_i}^2 - x_{k_{i-1}}^2 + y_{k_i}^2 - y_{k_{i-1}}^2}}{y_1 - y_n}, \quad (4)$$

где  $x_{k_i}$  – конечная продольная координата частиц, мм;

$y_{k_i}$  – конечная поперечная координата частицы, мм;

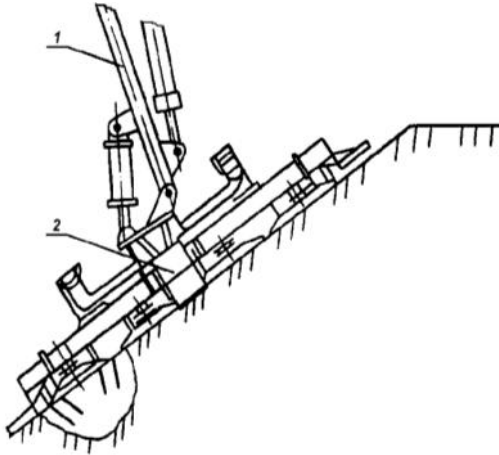
$y_1$  и  $y_n$  – соответственно начальные поперечные координаты первой и последней частицы, мм;

По поперечному, продольному перемещению частиц почвы и коэффициенту горизонтальной деформации почвенных слоев на откосе можно судить о качестве укладки почвы вдоль полосы рыхления фрезами с вертикальными элементами резания.

Значения перечисленных показателей будут зависеть от правильного выбора следующих параметров фрез: диаметра, количества и угла установки режущих элементов и их конструкции, а также от скорости вращения фрез и передвижения машины.

В связи с этим возникает задача выбора таких параметров фрез с вертикально режущими элементами, которые способствуют уменьшению перемещения частиц почвы в продольном и особенно в поперечном к откосу канала направлении, что дает возможность предохранить от засорения русла каналов почвенными частицами при необходимой степени крошения.

Для экспериментального определения таких параметров используем конструкцию образца планировщика НО-10. Теоретическое исследование кинематики горизонтально



**Рис. 1. Схема планировки откосов.**  
1 - рукоять; 2 - планировщик-рыхлитель  
активного действия

вращающихся фрез сделаем относительно конструкции, показанной на рис. 1.

Траектория движений режущих элементов, вертикально установленных на горизонтально вращающейся фрезе, является результатом их вращательного движения с угловой скоростью  $\omega$  и поступательного перемещения со скоростью  $v_m$ .

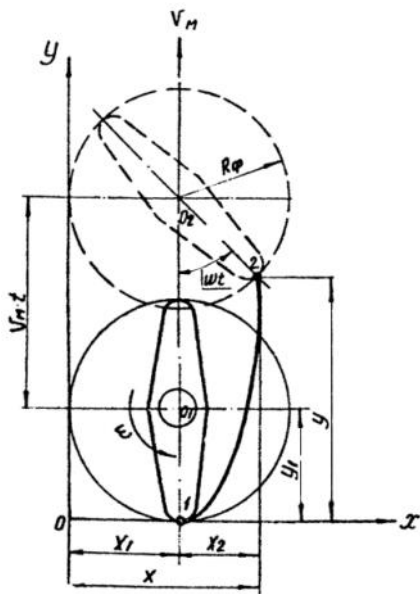
Рассматривая два последовательных положения режущего элемента на окружности фрезы (рис. 2), отделенных друг с друга промежутком времени  $t$ , можно написать:

$$x = x_1 + x_2 = R_\phi (1 + \sin \omega \cdot t),$$

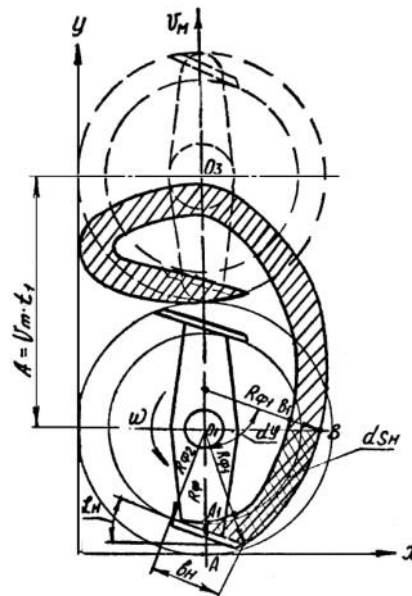
$$y = y_1 + v_m \cdot t - R_\phi \cos \omega t = v_m \cdot t + R_\phi (1 - \cos \omega t).$$

Полученные выражения представляют собой уравнение троихиды в параметрической форме.

Выразив  $\omega t$  через  $\phi$ , а  $v_m$  - через  $R_\phi$ ,  $\phi$  и показатель кинематического режима работы фрезы [1]



**Рис.2. Кинематика движения вертикально установленных режущих элементов на горизонтально вращающихся фрезях**



**Рис. 3. К определению площади, очерчиваемой режущим элементом горизонтально вращающейся фрезы**

$$\lambda = \frac{2\pi \cdot R_{\phi} \cdot n_{\phi}}{v_m}, \quad (5)$$

получим:

$$x = R_{\phi} (1 + \sin \varphi),$$

При установившемся движении  $v_m = \text{const}$  и  $n_{\phi} = \text{const}$ , следовательно  $\lambda = \text{const}$ . При этом режущий элемент очерчивает в горизонтальной плоскости площадку  $S_n$ , ограниченную двумя трохоидами (рис. 3), образованными крайними кромками режущего элемента шириной  $b_n$ .

Для первой трохоиды имеем

$$x = R_{\phi_1} (1 + \sin \varphi),$$

$$y = \frac{R_{\phi_2} \cdot \varphi}{\lambda} + R_{\phi_1} (1 - \cos \varphi)$$

для второй

$$x = R_{\phi_2} (1 + \sin \varphi),$$

$$y = \frac{R_{\phi_2} \cdot \varphi}{\lambda} + R_{\phi_2} (1 - \cos \varphi)$$

В общем случае элементарная площадь  $S_n$ , очерченная режущим элементом при повороте фрезы на элементарный угол (рис. 3) определится из выражения:

$$dS_n = dS_{A_1O_2B_1} - dS_{A_2O_2B_2} \quad (6)$$

Площади  $S_{A_2O_2B_2}$  и  $S_{A_1O_2B_1}$  определим по известной формуле:

$$S = \int_a^b f(x) dy \quad (7)$$

Тогда

$$S_n = \int_0^{\varphi} R_{\phi_1} (1 + \sin \varphi) \left[ \frac{R_{\phi_1}}{\lambda} + R_{\phi_1} \sin \varphi \right] - \int_0^{\varphi} R_{\phi_2} (1 + \sin \varphi) \left[ \frac{R_{\phi_2}}{\lambda} + R_{\phi_2} \sin \varphi \right] \cdot d\varphi \quad (8)$$

При повороте горизонтально вращающейся фрезы на один оборот

$$S_n = R_{\phi_1}^2 \cdot \int_0^{2\pi} \left( \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} \sin \varphi + \sin \varphi + \sin^2 \varphi \right) \cdot d\varphi - R_{\phi_2}^2 \cdot \int_0^{2\pi} \left( \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} \sin \varphi + \sin \varphi + \sin^2 \varphi \right) \cdot d\varphi = 2\pi \cdot \left( \frac{2}{\lambda} + 1 \right) \cdot R_{\phi_1}^2 - R_{\phi_2}^2 \quad (9)$$

Выразив  $R_{\phi 1}$  и  $R_{\phi 2}$  через средний диаметр фрезы  $R_{\phi}$  и ширину ножа  $b_n$  (рис. 3), получим

$$S_n = 2\pi \cdot R_{\phi} \left( \frac{2}{\lambda} + 1 \right) \cdot b_n \cdot \operatorname{tg} \alpha_n, \quad (10)$$

где  $\alpha_n$  – угол установки режущего элемента на фрезе (см. рис. 3).

Анализ формул (9) и (10) показывает, что большое влияние на толщину стружки и площадь  $S_n$ , т. е. в конечном итоге на качество крошения и рыхления почвы, оказывает показатель  $\lambda$  кинематического режима работы и ширина ножа  $b_n$ . Необходимо выбрать значения показателя кинематического режима работы фрезы, при которых гарантируется создание оптимальной структуры культурного слоя, наименьшие затраты энергии и при этом обеспечивается высокая производительность машины для подготовки откосов к посеву.

Для оценки степени влияния показателя  $\lambda$  на качество рыхления и крошения почвы проанализируем формулу (10).

1. При  $\lambda = 0$  (срабатывание предохранительной муфты привода фрезы)

$$S_n = \infty, \text{ если } v_m \neq 0, n_{\phi} = 0.$$

2. При  $0 < \lambda < 1$ ,  $S_n > 6\pi \cdot R_{\phi} \cdot b_n \cdot \operatorname{tg} \alpha_n$ , т. е. рыхление и крошение почвы фрезами всегда происходит при значительной толщине срезаемой стружки (малом значении коэффициента  $K$ ), что нерационально.

3. При  $\lambda = 1$ ,  $S_n = 6\pi \cdot R_{\phi} \cdot b_n \cdot \operatorname{tg} \alpha_n$ , т. е. толщина стружки остается значительной. Для этого случая работы горизонтально вращающихся фрез характерно равенство скоростей поступательного и окружной скорости вращательного движения ( $v_m = u$ ).

4. При  $\lambda > 1$ ,  $2\pi \cdot R_{\phi} \cdot b_n \cdot \operatorname{tg} \alpha_n < S_n < 6\pi \cdot R_{\phi} \cdot b_n \cdot \operatorname{tg} \alpha_n$ , т. е. площади минимально возможные и показатели рыхления и крошения наибольшие ( $K=80-95\%$ ).

Значение  $\lambda > 1$  при реальных скоростях движения действующих тракторов обеспечивается при установке на одну фрезу двух режущих ножей.

Например, при навеске на трактор ДТ-75Б фрез с  $R_{\phi} = 250$  мм и  $n_{\phi} = 4$  с<sup>-1</sup> показатель  $\lambda$  изменяется от 2,09 до 69,7.

Для выбора оптимального показателя  $\lambda$  определим подачу  $A$  за один оборот фрезы. При скорости поступательного движения фрезы  $v_m$  подачу  $A$  на нож выразим зависимостью

$$A = v_m \cdot t, \quad (11)$$

где  $t$  – время поворота фрезы на угол между двумя режущими элементами при частоте вращения  $n_{\phi}$  и числе режущих элементов  $z$ .

$$t = \frac{1}{n_{\phi} \cdot z}. \quad (12)$$

После подстановки значений  $v_m$  из (5) и  $t$  из (12), получим:

$$A = \frac{2\pi \cdot R_{\phi}}{\lambda \cdot z}. \quad (13)$$

Качество рыхления и крошения почвы на откосах можно регулировать в широких пределах. При значениях показателя  $\lambda$ , равных 24,07 – 69,7, значения  $A$  изменяются от 33 до 11,3 мм, т.е. при малых подачах на нож количество почвогрунта, подвергающегося ежесекундно обработке:

$$m = V \cdot \gamma, \quad (14)$$

где  $V$  – объем почвогрунта, срезаемого за одну секунду режущими элементами фрезы;

$\gamma$  – плотность почвы.

Объем вырезаемой за секунду стружки всеми режущими элементами горизонтально вращающейся фрезы определим по формуле:

$$V = h_{\phi} \cdot n_{\phi} \cdot z \cdot S_{\pi} = 2\pi R_{\phi} \left( \frac{2}{\lambda} + 1 \right) \cdot b_{\phi} \cdot \sin L_{\pi} h_{\phi} \cdot n_{\phi} \cdot z, \quad (15)$$

где  $h_{\phi}$  – глубина фрезерования, см;

$z$  – число режущих элементов на фрезе.

При малых подачах на нож  $A$  равных 11,3 – 33 мм, будет происходить скалывание почвы между площадками  $S$  и образование фракции комков почвы размером более 10 мм в небольшом количестве 10-15%. С увеличением подачи на нож  $A$  образование комков почвогрунта размером более 10 мм будет увеличиваться.

Для оценки энергоемкости процесса крошения и рыхления верхнего слоя почвогрунта на откосе определим энергию, необходимую для создания оптимальной структуры культурного слоя. Сначала определяем работу рыхления и крошения почвогрунта при выполнении технологического процесса.

Рассмотрим работу вертикально режущего элемента шириной  $b_{\phi}$ , обрабатывающего почвогрунт с подачей  $A$  по пути, соответствующему показателю кинематического режима работы  $\lambda$  и углу поворота фрезы  $\varphi$ . За один оборот горизонтально вращающейся фрезы режущий элемент производит работу  $A_{\phi}$ . Элементарная работа, затрачиваемая на обработку почвогрунта, при повороте горизонтально вращающейся фрезы на угол  $\varphi$  для одного режущего элемента, определяется из выражения:

$$dA_{\phi} = P \cdot dl_{\phi}, \quad (16)$$

где  $l_{\phi}$  – элементарный путь режущего элемента.

Величину  $l_{\phi}$  определяем по формуле (17), рис. 4.

$$\begin{aligned} l_{\phi} &= \int_0^{\varphi} \sqrt{dx^2 + dy^2} = \int_0^{\varphi} \sqrt{R_{\phi}^2 \left( 1 + \sin^2 \varphi \right) dy^2 + \left[ \frac{R_{\phi} \cdot \varphi}{\lambda} + R_{\phi} \left( 1 + \cos \varphi \right) \right]^2 dy^2} = \\ &= \int_0^{\varphi} \sqrt{R_{\phi}^2 \cdot \cos^2 \varphi + \frac{R_{\phi}^2}{\lambda} + \frac{2R_{\phi}^2}{\lambda} \sin \varphi + R_{\phi}^2 \sin^2 \varphi} \cdot dy = R_{\phi} \sqrt{\frac{2}{\lambda}} \int_0^{\varphi} \sqrt{k + \sin^2 \varphi} \cdot dy = \\ &= \sqrt{\frac{2k}{\lambda}} \cdot R_{\phi} \int_0^{\varphi} \left( 1 + \frac{1}{k} \sin^2 \varphi \right) \cdot dy = 2\pi \sqrt{\frac{2k}{\lambda}} R_{\phi} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\lambda^2 + 1} R_{\phi}, \end{aligned} \quad (17)$$



показателей работы всей машины для подготовки откосов к посеву трав – производительность. На производительность машины в большой степени влияют и принципиальная схема выполнения технологических операций обработки почвогрунта на откосах, ширина захвата обрабатываемой полосы и скорость машины  $v_m$  (1).

В основу схемы подготовки откосов к посеву трав положен принцип непрерывного выполнения технологических операций, см. рис. 1.

Тогда производительность машины определим из выражения

$$P = 10^3 \cdot \beta \cdot b \cdot v_m. \quad (23)$$

где  $\beta = 1 - t_3$  – коэффициент использования рабочего времени, который уточняют экспериментальным путем;  $t_3$  – затраты времени на холостой ход, разворот машины и установку рабочего органа на откос;  $t$  – продолжительность цикла;  $b$  – ширина захвата обрабатываемой полосы, м.

Величину  $b$  можно определить из выражения

$$b = 2 \cdot R_\phi \cdot i_\phi. \quad (24)$$

где  $i_\phi$  – число фрез на рабочем органе.

Тогда

$$P = 2 \cdot 10^3 \cdot \beta \cdot R_\phi \cdot i_\phi \cdot v_m. \quad (25)$$

### Выводы

1. Выполненные исследования дали возможность рекомендовать показатель кинематической работы горизонтально вращающейся фрезы  $5 \leq \lambda \leq 63$ , что обеспечивает создание на откосах оптимальной структуры почвогрунта с величиной комков от 0,25 до 10 мм при  $k = 65 - 95\%$ .

2. Исследования показали, что мощность, затрачиваемая на подготовку откосов к посеву травами одной фрезой ( $R_\phi = 250$  мм и  $h_\phi = 100 \div 350$  мм) составляет 6-13 л/с., что в 1,5 раза меньше мощности, затрачиваемой планировщиками пассивного типа. При этом производительность планировщика равна 0,34-0,7 га/ч.

3. Теоретические выводы использованы при усовершенствовании образца планировщика-рыхлителя активного действия к экскаватору ЭО-3223.

4. Исследования показали, что глубина рыхления регулируется в пределах 0,15-0,30 м установкой уплотняющего и опорного катков на необходимую высоту относительно фрез или заменой ножей. Поверхность уплотняющего катка может быть выполнена гладкой или гофрированной, что позволяет при уплотнении грунта создать специальные продольные бороздки, которые улучшают равномерность распределения семян и минеральных удобрений при последующих технологических операциях. Взрыхленные полосы в сечении имеют вид трапеции с малым нижним основанием. Необработанные полосы между взрыхленными удерживают почвогрунт от сползания в русло канала.



**Литература**

1. Кондратьев, В.Н. Оптимизация параметров планировщика-рыхлителя откосов каналов НО-10 посредством многофакторного эксперимента / В.Н. Кондратьев, П.Н. Побединский // Мелиор. переувлажненных земель: сб. науч. работ / БелНИИиВХ.– Мн. – Т.ХХХVII, 1989. – С.72-80.
2. Кондратьев, В.Н. Программная реализация математической обработки многофакторного эксперимента / В.Н. Кондратьев, Г.А. Писецкий // Математическое моделирование сельскохоз. объектов – основа проектир. технологий и машин XXI века. тез. Междунар. конф. (г. Минск, 27-28 февр. 2001 г.). – Мн. 2001.– С.259-262.

**Summary**

***Kondratjev V., Raikevich N. Theoretical study of operation of horizontally rotating cutter, determining of drive power***

The study of cultivation and repartition of soil with knives mounted at the edge of bars showed that cultivation depth is adjusted within 0.15-0.30 m by setting sealing and supporting rollers for required height relatively the cutters or with replacement of knives. The surface of sealing roller may be designed smooth or corrugated so enabling to create special lengthwise furrows at soil consolidation providing for the improvement of uniform distribution of seeds and fertilizers at succeeding working operations. Loosened strips have trapeziform section with small lower base. Unprocessed strips between the loosened strips keep soil from sliding to the channel bed. Trapeziform sections of unprocessed balks increase their strength.

*Поступила 4 января 2008 г.*