

УДК 631.317

И. С. НАГОРСКИЙ, В. Н. ДАШКОВ, В. В. АЗАРЕНКО, В. Б. ЛОВКИС

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФРЕЗЫ С ДЕРНИНОЙ

Институт механизации сельского хозяйства НАН Беларуси

(Поступила в редакцию 12.05.2005)

Введение. Высокоэффективным агротехническим приемом улучшения лугопастбищных угодий является подсев бобовых трав. Для этого в Институте механизации сельского хозяйства НАН Беларуси разработана новая машина МТД-3,0, технологическая схема которой в полной мере соответствует требованиям ресурсосберегающей безгербицидной технологии посева трав в дернину. Она одновременно выполняет несколько технологических операций: фрезерование дернины, посев семян трав и прикатывание посевов.

Анализ математических моделей кинематики движения ножей фрезы при встречном и попутном фрезеровании [1] и статистических моделей измельчения дернины [2] позволил обосновать рациональные параметры конструкции и режимы работы фрезы.

Цель исследования — поиск путей совершенствования почвенной фрезы: повышения качества работ (прежде всего, лучшего заполнения измельченной почвой фрезеруемых канавок) и в то же время снижения удельной энергоемкости технологического процесса.

Постановка задачи. При взаимодействии ножа фрезы с почвой можно выделить три фазы (рис. 1):

♦ Сначала нож, врезаясь в почву почти вертикально, отделяет от монолита большую часть объема срезаемой стружки, которая крошится и осыпается в образованную бороздку (фаза I):

$$V_1 = B_n H h_1 \approx 0,8 B_n H h,$$

где B_n — ширина ножа; $H = \frac{v}{\omega} \frac{2\pi}{z}$ — подача на один нож; v и ω — соответственно скорость поступательного движения фрезы и угловая скорость ее вращения; z — количество ножей фрезы в диаметральном ее сечении.

♦ Во второй фазе нож, продолжая срезать оставшуюся часть стружки, взаимодействует с почвой, которая заполняет профрезерованную канавку. При этом могут иметь место два процесса, существенно отличающиеся друг от друга. Если угол установки ножа большой, то почва сгруживается перед ножом, тем самым увеличивая сопротивление вращению фрезы. При малых углах установки нож как прямой острый клин движется в разрыхленной почве, которая пересыпается через его верхнюю грань. Деформация почвы в этом случае небольшая, следовательно, невелико и сопротивление перемещению ножа.

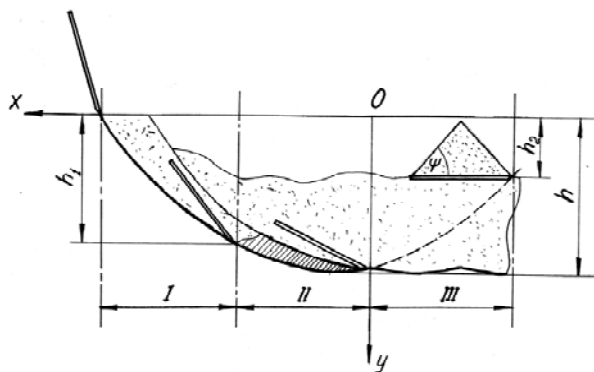


Рис. 1. Фазы взаимодействия ножа фрезы с почвой

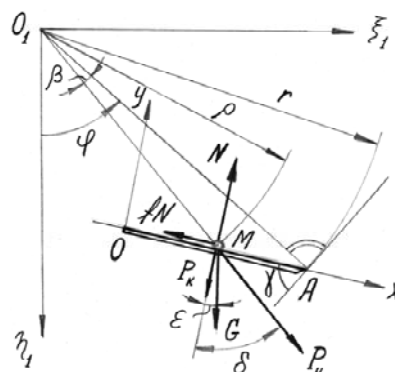


Рис. 2. Расчетная схема относительного движения материальной точки M по ножу

♦ Третью фазу характеризует выход ножа из разрыхленного слоя почвы. Здесь опять-таки ножи с большим и малым углами установки взаимодействуют с почвой по-разному. Нож с большим углом установки выбрасывает почву из канавки. Можно предположить, что нож с малым углом установки при выходе из разрыхленного слоя почву выносить не будет.

Относительное движение почвы по ножу. Для проверки сделанного предположения исследуем относительное движение почвы по ножу. Составим уравнения движения материальной точки M в неинерциальной системе координат Oxy , которая совершает переносное движение по отношению к инерциальной системе $O_1\xi_1\eta_1$ (рис. 2), прибавляя к активным силам и реакции связи N силы инерции: переносную

$$\vec{\Phi}_{\text{пер}} = -m\vec{w}_{\text{пер}}$$

и кориолисову (поворотную)

$$\vec{\Phi}_{\text{к}} = -m\vec{w}_{\text{к}},$$

где $\vec{w}_{\text{пер}}$ и $\vec{w}_{\text{к}}$ — векторы ускорений соответственно переносного и поворотного; m — масса материальной точки M .

Поскольку скорость поступательного движения фрезы $v_n = \text{const}$, переносное ускорение обусловлено только переносным вращением, направленным по радиусу $\rho(x)$ к оси вращения:

$$w_{\text{пер}} = \rho(x)\omega^2.$$

Кориолисово ускорение

$$w_{\text{к}} = 2\omega v_{\text{от}} \sin \frac{\pi}{2} = 2\omega v_{\text{от}},$$

где $v_{\text{от}}$ — относительная скорость движения точки M .

Согласно правилу Н. Е. Жуковского, определяем, что оно направлено по нормали к плоскости ножа.

Таким образом, для ножа с большим углом установки γ с учетом значений силы тяжести $G = mg$, центробежной силы инерции (рис. 2)

$$P_{\text{ц}} = |\vec{\Phi}_{\text{пер}}| = m\rho(x)\omega^2$$

и кориолисовой силы инерции

$$P_{\text{к}} = |\vec{\Phi}_{\text{к}}| = 2m\omega\dot{x},$$

имеем:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= -fN + mg \sin \varepsilon(t) + m\rho(x)\omega^2 \sin \delta(x), \\ m\ddot{y} &= N - 2m\omega\dot{x} - mg \cos \varepsilon(t) - m\rho(x)\omega^2 \cos \delta(x), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где \ddot{x} и $\ddot{y} = 0$ — проекции относительного ускорения точки M на оси Ox и Oy ; g — ускорение свободного падения; f — коэффициент внешнего трения почвы о сталь; φ_0 — начальный угол поворота радиуса r ;

$$\varepsilon(t) = \gamma - \varphi_0 - \omega t; \quad \delta(x) = \gamma - \beta(x); \quad \beta(x) = \text{arctg} \frac{(L_{\text{н}} - x) \cos \gamma}{r - (L_{\text{н}} - x) \sin \gamma};$$

$$\rho(x) = \sqrt{r^2 + (L_{\text{н}} - x)^2 - 2r(L_{\text{н}} - x) \sin \gamma} \quad \text{или} \quad \rho(x) = \frac{r \cos \gamma}{\cos \delta(x)}.$$

Угол φ_0 определяем, исходя из предположения, что нож, срезав стружку объемом

$$V_c = B_H H h,$$

выносит из бороздки, если в момент выхода из разрыхленного слоя он занимает горизонтальное положение (рис. 1), наибольший объем почвы

$$V_2 = \frac{B_H L_H^2}{4} \operatorname{tg} \psi, \quad (2)$$

где $\psi \approx 45^\circ$ — угол естественного откоса измельченной дернины.

С другой стороны,

$$V_2 = B_H H h_2,$$

откуда, с учетом формулы (2),

$$h_2 = \frac{L_H^2 \operatorname{tg} \psi}{4H} = \frac{\omega z L_H^2 \operatorname{tg} \psi}{8\pi v}.$$

Таким образом, нож может вынести из бороздки третью часть срезанной стружки ($V_2/V_c = 0,33$). Если $L_H = 0,05$ м, $\omega = 40$ рад/с, $z = 12$ и $v = 1,8$ м/с, то

$$h_2 = 0,027 \text{ м} \quad \text{и} \quad \varphi_0 = \arccos \frac{r - (h - h_2)}{r} = 38,2^\circ.$$

Принимаем $\varphi_0 = 40^\circ = 0,698$ рад.

После исключения из системы уравнений (1) реакции связи N и преобразований, имеем:

$$\ddot{x} + 2f\omega\dot{x} - \omega^2 x = M \cos \omega t + N \sin \omega t - b_0, \quad (3)$$

где

$$M = -g[f \cos(\gamma - \varphi_0) - \sin(\gamma - \varphi_0)]; \quad N = -g[f \sin(\gamma - \varphi_0) + \cos(\gamma - \varphi_0)];$$

$$b_0 = \omega^2 [(f \cos \gamma - \sin \gamma)r + L_H].$$

Если движение точки M начинается из начала системы координат Oxy (от верхней кромки ножа), то начальные условия

$$t = 0 | x = x_0 = 0; \quad \dot{x} = \dot{x}_0 = 0. \quad (4)$$

В общем случае система уравнений (1) является нелинейной, поскольку сила трения

$$F = -fN \operatorname{sign} v, \quad \text{если} \quad K = \frac{g \sin \varepsilon(t) + \omega^2 \rho(x) \sin \delta(x)}{2\omega\dot{x} + g \cos \varepsilon(t) + \omega^2 \rho(x) \cos \delta(x)} > f.$$

Если же $K \leq f$, то движущие силы не могут преодолеть силу трения. Так, при $r = 0,25$ м, $L_H = 0,05$ м, $\omega = 40$ рад/с, $\varphi_0 = 40^\circ$ и начальных условиях (4) и $\gamma = 60^\circ$, $K = 1,289 > f = 0,7$. При тех же параметрах и начальных условиях, но $\gamma = 30^\circ$, $K = 0,332 < f$, то есть относительного движения частицы по плоскости ножа не происходит.

Общее решение уравнения (3), которое является обыкновенным неоднородным дифференциальным уравнением, линейным относительно неизвестной функции $x(t)$ и ее производных, — это сумма общего решения соответствующего однородного уравнения и какого-нибудь частного решения неоднородного уравнения (3):

$$x = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + A \cos \omega t + B \sin \omega t + (f \cos \gamma - \sin \gamma)r + L_H; \quad (5)$$

$$\dot{x} = \lambda_1 C_1 e^{\lambda_1 t} + \lambda_2 C_2 e^{\lambda_2 t} - \omega A \sin \omega t + \omega B \cos \omega t, \quad (6)$$

где произвольные постоянные, определяемые с учетом начальных условий (4),

$$C_1 = \frac{\omega B - \lambda_2 [A + (f \cos \gamma - \sin \gamma)r + L_H]}{\lambda_2 - \lambda_1}; \quad C_2 = \frac{\lambda_1 [A + (f \cos \gamma - \sin \gamma)r + L_H] - \omega B}{\lambda_2 - \lambda_1};$$

коэффициенты, определяемые методом вариации произвольных постоянных [3, с. 88, 94],

$$A = \frac{-g[(1-f^2)\sin(\gamma-\varphi_0) - 2f \cos(\gamma-\varphi_0)]}{2\omega^2(1+f^2)}; \quad B = \frac{g[2f \sin(\gamma-\varphi_0) + (1-f^2)\cos(\gamma-\varphi_0)]}{2\omega^2(1+f^2)}.$$

Если $r = 0,25$ м; $L_H = 0,05$ м; $\omega = 40$ рад/с; $f = 0,7$; $\varphi_0 = 40^\circ = 0,697$ рад; $\gamma = 60^\circ = 1,047$ рад, то $\lambda_1 = 20,826$ рад/с; $\lambda_2 = -76,826$ рад/с; $A = 2,348 \cdot 10^{-3}$ м; $B = 1,971 \cdot 10^{-3}$ м; $C_1 = 0,06$ м и $C_2 = 0,017$ м.

Вычислим по формулам (5) и (6) $x(t_i)$ и $v = \dot{x}(t_i)$ при дискретных значениях аргумента $t_i = 0,003589i$, $i = 0 \dots 5$ (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Расчетные значения общего решения x уравнения (3) по формуле (5) и производной \dot{x} по формуле (6)

$t_i, \text{ с}$	0	0,003589	0,007178	0,010767	0,014356	0,017945
$x(t_i), \text{ м}$	0	0,000741	0,002784	0,005911	0,009968	0,014846
$\dot{x}(t_i), \text{ м/с}$	0	0,400	0,729	1,007	1,249	1,466

Достоверность формулы (5) проверяем, решая уравнение (3) численным методом. Запишем условия решаемой задачи в векторной форме [4, с. 633—635]:

$$D(t, x) := \begin{bmatrix} x_1 \\ -2f\omega x_1 + \omega^2 x_0 - g(f \cos(\gamma - \varphi_0 - \omega t) - \sin(\gamma - \varphi_0 - \omega t)) - \omega^2 [(f \cos(\gamma) - \sin(\gamma))r + L_H] \end{bmatrix}; \quad x_0 := \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Для решения системы составленных дифференциальных уравнений используем в пакете прикладных математических программ MathCAD специальную встроенную функцию

$$Z := \text{rkfixed}[x_0, t_0, t_5, M, D],$$

где x_0 и D — вектор начальных условий и вектор-функция (7); t_0 и t_5 — начальное и конечное значения независимой переменной (в нашем случае времени); M — количество шагов, при котором решается система.

Примем $t_0 = 0$; $t_5 = 5$ с и $M = 5$. Результат решения получаем в виде матрицы с числом строк $M+1$ (табл. 2), в первом столбце которой содержатся узловые величины переменной t_i , а во втором и третьем столбцах — расчетные значения $x(t_i)$ и $\dot{x}(t_i)$.

Т а б л и ц а 2. Результаты решения уравнения (3) численным методом

	$t_i, \text{ с}$	$x(t_i), \text{ м}$	$\dot{x}(t_i), \text{ м/с}$
$Z =$	0	0	0
	0,003589	0,000742	0,400
	0,007178	0,002784	0,729
	0,010767	0,005912	1,007
	0,014356	0,009968	1,249
	0,017945	0,014846	1,466

Результаты вычислений по формулам (5) и (6) (табл. 1) и численного решения уравнения (3) практически совпадают.

Обсуждение результатов. Частица почвы (материальная точка M), перемещаясь относительно ножа, достигает его кромки и начинает свободное движение.

Если в общем решении (5) уравнения (3) $x = L_H$, то

$$C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + A \cos \omega t + B \sin \omega t + (f \cos \gamma - \sin \gamma) r = 0,$$

откуда численным методом определяем время, за которое нож полностью освобождается от почвы, вынесенной им из канавки. Это время t_k движения частицы от верхней до нижней кромки ножа.

Начальные условия свободного движения точки M определяем, используя расчетную схему (рис. 3).

Угол поворота фрезы за время t_k

$$\varphi_k = \varphi_0 + \omega t_k.$$

Координаты точки $M(\xi_M, \eta_M)$ в тот момент, когда она перестает контактировать с ножом,

$$\xi_M = r \sin \varphi_k; \quad \eta_M = r \cos \varphi_k.$$

Начальная скорость частицы, брошенной под углом α_0 к горизонту,

$$v_0 = \sqrt{r^2 \omega^2 + \dot{x}^2 + 2r\dot{x}\omega \cos \gamma};$$

угол

$$\alpha_0 = \varphi_k - \theta = \varphi_k - \arctg \frac{\dot{x} \sin \gamma}{r\omega + \dot{x} \cos \gamma}.$$

Измельченная дернина, ударяясь о кожух фрезы, будет падать в канавку и заполнять ее в том случае, если

$$\varphi_k \leq \frac{\pi}{2} \quad \text{и} \quad \alpha_0 < \frac{\pi}{2}. \quad (8)$$

Начальные условия свободного движения частиц фрезеруемой почвы при разных углах γ установки ножей приведены в табл. 3. Условия (8) выполняются только при углах $\gamma = 80^\circ - 90^\circ$, однако в этом случае (при больших значениях γ) повышается энергоемкость процесса.

Т а б л и ц а 3. Влияние угла установки ножа (γ , град) на начальные условия свободного движения частицы почвы при $L_H = 0,05$ и $\varphi_0 = 40^\circ = 0,698$ рад

γ , град	50	60	70	80	90
t_k , с	0,06667	0,03589	0,02713	0,02292	0,02052
φ_k , град	192,8	122,3	102,2	92,5	87,0
$v_{от}$, м/с	1,574	2,451	3,228	3,841	4,316
v_0 , м/с	11,08	11,42	11,51	11,32	10,89
α_0 , град	186,5	111,5	86,9	73,0	63,7
K_1	0,86	1,29	2,07	4,16	51,94

Простым способом предотвращения (или уменьшения) перебрасывания дернины фрезой по ходу ее поступательного движения является уменьшение длины L_H ножей. Например, если $L_H = 0,025$ м, то по сравнению с фрезой, у которой $L_H = 0,05$ м, во-первых, с учетом формулы (2), объем почвы V_2 , выносимой из канавки, снижается в 4 раза. Во-вторых, при

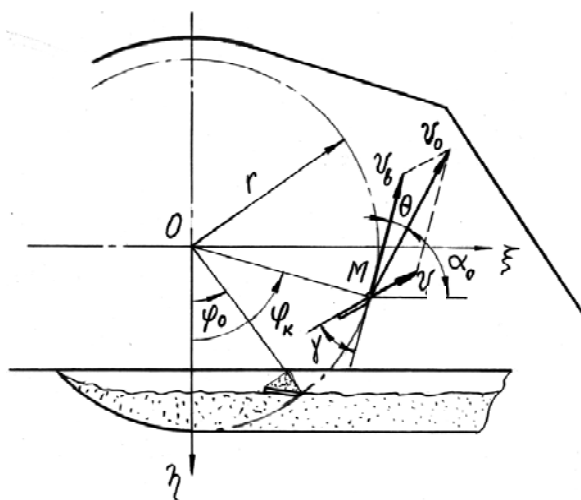


Рис. 3. Расчетная схема к определению начальных условий свободного движения частицы почвы

этом, несмотря на то, что несколько увеличивается угол $\varphi_0 = 45^\circ = 0,785$ рад, условиям (8) удовлетворяет нож с углом установки $\gamma = 60^\circ$ (табл. 3).

Интенсивность относительного движения частиц почвы по ножу в зависимости от угла γ можно объяснить изменением показателя

$$K_1 = K/f,$$

характеризующего отношение движущих сил к силе трения и приведенного в последней строке табл. 3. Чем больше это отношение, тем быстрее частица почвы достигает режущей кромки ножа и теряет с ним контакт.

Исследование взаимодействия почвы с ножами фрезы при угле их установки $\gamma = 10^\circ$ не оправдало предположения о том, что в этом случае почва не будет выноситься из фрезеруемой канавки, пересыпаясь через верхнюю кромку ножа.

Требованиям (8) заполнения почвой фрезеруемых канавок удовлетворяют ножи с углами установки $\gamma \leq -40^\circ$. Однако они не работоспособны на I и II фазах фрезерования почвы как видно из рис. 1. Это противоречие можно преодолеть, если изменять угол установки ножа в процессе взаимодействия его с почвой.

Выводы. В результате исследования относительного движения по ножу фрезы частиц почвы, выносимых им из фрезеруемой в дернине канавки, получены начальные условия их свободного движения. Это позволило определить условия заполнения канавок измельченной почвой и наметить направления дальнейшего совершенствования машины для полосового подсева бобовых трав в дернину лугопастбищных угодий МТД-3, прошедшей приемочные испытания в ГУ «Белорусская МИС» и изготовленной опытной партией.

Литература

1. Нагорский И. С., Азаренко В. В., Клыбик В. К. // Весті НАН Беларусі. Сер. аграр. навук. 2004, № 4. С. 92—98.
2. Нагорский И. С., Азаренко В. В., Клыбик В. К. Статистический анализ измельчения дернины фрезой // Механизация и электрификация сельского хозяйства: Межвед. темат. сб. Вып. 38. Мн., 2004. С. 249—255.
3. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления Т. 2. М., 1976.
4. Гурский Д. А. Вычисления в MathCAD. Мн., 2003.

NAGORSKY I. S., DASHKOV V. N., AZARENKO V. V., LOVKIS V. B.

INTERACTION OF A CUTTER WITH A SOD

Summary

Conditions of quality realization of the technologic process by working parts of soil cutter of the MTD-3 machine elaborated at the Institute of a farm machanization of the National academy of sciences of Belarus have been studied and proved by the method of mathematic modeling. This soil cutter is designed for legumes seeds undersowing to a of haymakings and pastures without application of herbicides.