

ОЦЕНКА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ДЕРНИНЫ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ

И.С. НАГОРСКИЙ, академик, В.В. АЗАРЕНКО, к.т.н., В.К. КЛЫБИК (РУНИП «ИМСХ НАН Беларуси»)

В статье изложен метод определения вероятности превышения частицами дернины, измельчаемой почвенной фрезой, агротехнического допуска и обоснованы режимы работы агрегата для поверхностного улучшения лугопастбищных угодий путём подсева бобовых трав.

Введение

Обеспечение продовольственной безопасности страны на основе претворения в жизнь программы возрождения и развития села требует оснащения сельских производителей ресурсосберегающей техникой для интенсивных технологий. Это позволит, снизив себестоимость продукции, сделать её конкурентоспособной на внутреннем и внешнем рынках.

Важным направлением совершенствования сельскохозяйственного производства нашей страны, с учётом её почвенно-климатических условий, является приоритетное развитие отрасли животноводства. Для этого требуется создание прочной кормовой базы, в том числе за счёт устойчиво высокой продуктивности лугопастбищных угодий. Поэтому актуальной задачей агроинженерной науки является обоснование рациональных параметров новой техники для поверхностного улучшения сенокосов и пастбищ подсевом бобовых трав. При её проектировании надо, прежде всего, обеспечить требуемое агротехникой качество выполнения технологического процесса.

1. Методы исследования

Для определения формы и размеров стружек, отделяемых от дернины ножами почвенной фрезы, составляем уравнения движения режущей кромки ножа 1 (рис. 1), траек-

тория которой является образующей свободной поверхности стружки, и уравнения движения ножа 2, срезающего стружку.

При попутном фрезеровании, когда движение ножей при взаимодействии их с почвой противоположно направлению поступательного движения фрезы, имеем:

$$\left. \begin{aligned} x_{n1}(t) &= \frac{v}{\omega} (\omega t - \varphi_{nn}) - r \sin (\omega t - \varphi_{nn}) - \frac{H}{2}; \\ y_{n1}(t) &= r \cos (\omega t - \varphi_{nn}) - r + h \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} x_{n2}(t) &= \frac{v}{\omega} (\omega t - \varphi_{nn}) - r \sin (\omega t - \varphi_{nn}) + \frac{H}{2}; \\ y_{n2}(t) &= r \cos (\omega t - \varphi_{nn}) - r + h \end{aligned} \right\}$$

где $x_{n1}(t)$, $y_{n1}(t)$ и $x_{n2}(t)$, $y_{n2}(t)$ - координаты режущих кромок ножей 1 и 2, м;

t - время, с;

v , r и ω - соответственно скорость поступательного движения фрезы ($м/с$), её радиус ($м$) и угловая скорость вращения, $рад/с$;

$\varphi_{nn} = \arccos \frac{r-h}{r}$ - угол отклонения от вертикали радиуса r , проведенного к режущей кромке ножа 1, в начале резания стружки (см. рис. 1);

$H = \frac{v}{\omega} \cdot \frac{2\pi}{z}$ - подача на один нож;

z - количество ножей фрезы в

диаметральном её сечении.

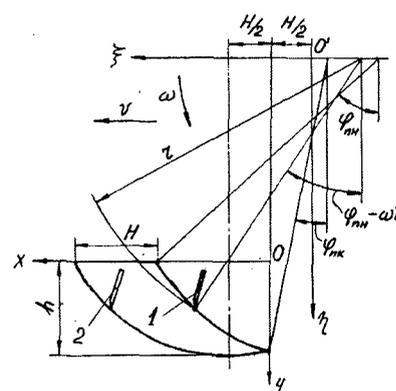


Рис. 1. Расчётная схема к определению формы и размеров стружки при попутном фрезеровании: 1 и 2 - соответственно первый и второй ножи

Время начала резания стружки $t_{n1н} = t_{n2н} = 0$; время окончания резания стружки ножами 1 и 2 соответственно

$$t_{n1к} = \frac{\varphi_{nn} - \varphi_{нк}}{\omega} \quad \text{и} \quad t_{n2к} = \frac{\varphi_{nn} + \varphi_{нк}}{\omega},$$

где $\varphi_{нк}$ - угол, на который радиус r , проведенный к кромке ножа 1, отклоняется от вертикали в конце резания стружки, определяем, решая численным методом уравнение

$$\frac{r\omega}{v} \sin \varphi_{нк} = \varphi_{нк} + \frac{\pi}{z}.$$

Уравнение образующей свободной поверхности стружки (траектория ножа 1 в неявном виде) при попутном фрезеровании

$$F(x_{n1}, y_{n1}) = x_{n1} + \frac{v}{\omega} \arccos \frac{y_{n1} + r - h}{r} - \sqrt{(h - y_{n1})(2r - h + y_{n1})} + \frac{H}{2} = 0. \quad (1)$$

Траектория ножа 2 в неявном виде

$$F(x_{n2}, y_{n2}) = \begin{cases} x_{n2} - \frac{v}{\omega} \arccos \frac{y_{n2} + r - h}{r} + \sqrt{(h - y_{n2})(2r - h + y_{n2})} - \frac{H}{2} = 0, & 0 \leq x_{n2} \leq \frac{H}{2}; \\ x_{n2} + \frac{v}{\omega} \arccos \frac{y_{n2} + r - h}{r} - \sqrt{(h - y_{n2})(2r - h + y_{n2})} - \frac{H}{2} = 0, & \frac{H}{2} \leq x_{n2} \leq r \sin \varphi_{nn} - \frac{v}{\omega} \varphi_{nn} + \frac{H}{2}. \end{cases} \quad (2)$$

Аналогично получаем уравнения движения ножей фрезы при встречном фрезеровании:

$$F(x_{e1}, y_{e1}) = x_{e1} - \frac{v}{\omega} \arccos \frac{y_{e1} + r - h}{r} - \sqrt{(h - y_{e1})(2r - h + y_{e1})} + \frac{H}{2} = 0. \quad (3)$$

$$F(x_{e2}, y_{e2}) = \begin{cases} x_{e2} + \frac{v}{\omega} \arccos \frac{y_{e2} + r - h}{r} + \sqrt{(h - y_{e2})(2r - h + y_{e2})} - \frac{H}{2} = 0, & 0 \leq x_{e2} \leq \frac{H}{2}; \\ x_{e2} - \frac{v}{\omega} \arccos \frac{y_{e2} + r - h}{r} - \sqrt{(h - y_{e2})(2r - h + y_{e2})} - \frac{H}{2} = 0, & \frac{H}{2} \leq x_{e2} \leq \frac{v}{\omega} \arccos \frac{r - h}{r} + \sqrt{(h - y_{e2})(2r - h + y_{e2})} + \frac{H}{2}. \end{cases} \quad (4)$$

Ножи фрезы, прорезая в почве канавку, измельчают травостой и корневища сорняков, которые в обрабатываемом слое почвы располагаются горизонтально (пырей) или вертикально (осот).

Все горизонтальные сечения стружки, отрезаемой ножом шириной B_n при подаче H , представляют собой прямоугольники площадью $S_0 = B_n H$.

Полагая, что стебли травостоя и корневища пырея расположены в горизонтальной плоскости равновероятно, определяем длину отрезаемого ножом стебля (рис.2):

$$l = \begin{cases} \frac{B_n}{\cos \psi}, & 0 \leq \psi \leq \arctg \frac{H}{B_n}; \\ \frac{H}{\sin \psi}, & \arctg \frac{H}{B_n} \leq \psi \leq \frac{\pi}{2}. \end{cases}$$

Используем геометрическое определение вероятности, состоящее в том, что вероятность случайного события A

$$P_A = \frac{S_A}{S_0}, \quad (5)$$

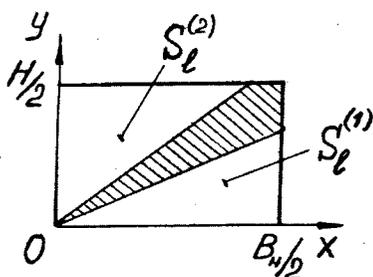
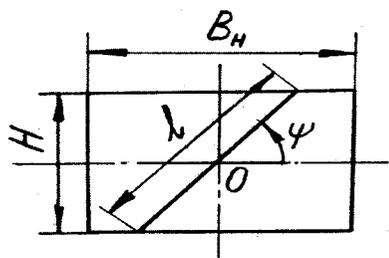


Рис. 2. Схема к определению геометрической вероятности превышения агротехнического допуска $[l]$ на длину частиц измельченных стеблей (корневищ)

где S_0 и S_A - геометрические меры некоторой области возможных значений l (в нашем случае площадь $S_0 = B_n H$) и той её части, попадание в которую благоприятствует событию $A (l \leq [l])$;

$[l]$ - допустимая, ограниченная агротехническими или исходными требованиями длина измельченных частиц травостоя (корневищ).

Если рассматривать 1/4 площади S_0 (см. рис. 2), то её часть, благоприятствующая событию A при $0 \leq \psi \leq \arctg \frac{H}{B_n}$,

$$S_l^{(1)} = \frac{B_n^2}{8} \int_0^{\arccos \frac{B_n}{[l]}} \frac{d\psi}{\cos^2 \psi} = \frac{B_n^2}{8} \operatorname{tg} \psi \Big|_0^{\arccos \frac{B_n}{[l]}} = \frac{B_n}{8} \sqrt{[l]^2 - B_n^2}, \quad B_n \leq [l] \leq \sqrt{H^2 + B_n^2}$$

и в случае $\arctg \frac{H}{B_n} \leq \psi \leq \frac{\pi}{2}$

$$S_l^{(2)} = \frac{H^2}{8} \int_{\arcsin \frac{H}{[l]}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\psi}{\sin^2 \psi} = -\frac{H^2}{8} \operatorname{ctg} \psi \Big|_{\arcsin \frac{H}{[l]}}^{\frac{\pi}{2}} = \frac{H}{8} \sqrt{[l]^2 - H^2}, \quad H \leq [l] \leq \sqrt{H^2 + B_n^2}.$$

Соответственно вероятности благоприятного события $A (l \leq [l])$

$$p^{(1)} = \frac{\sqrt{[l]^2 - B_n^2}}{2H} \quad \text{и} \quad p^{(2)} = \frac{\sqrt{[l]^2 - H^2}}{2B_n} \quad \text{при} \quad [l] \leq l_{\max} = \sqrt{B_n^2 + H^2}.$$

Таким образом, вероятность того, что длина частиц измельченного тра-

востоя (корневищ) превышает $[l]$,

$$P(l \geq [l]) = 1 - p^{(1)} - p^{(2)} \quad (6)$$

Обратная задача состоит в определении допустимого размера $[l]$ измельчённых частиц травостоя при заданной вероятности $P(l \geq [l])$. В этом случае из уравнения (6) имеем:

$$\frac{\sqrt{[l]^2 - B_n^2}}{2H} + \frac{\sqrt{[l]^2 - H^2}}{2B_n} = 1 - P(l \geq [l]),$$

откуда

$$A_1 [l]^4 + B_1 [l]^2 + C_1 = 0, \quad (7)$$

где

$$A_1 = -(B_n^2 - H^2)^2; \quad B_1 = 2(B_n^2 + H^2) \cdot [(B_n^2 - H^2)^2 + 4p_o^2 B_n^2 H^2];$$

$$C_1 = 4B_n^4 H^4 - (B_n^4 + H^4 + 4p_o^2 B_n^2 H^2)^2; \quad p_o = 1 - P(l \geq [l]).$$

Из биквадратного уравнения (7) получаем

$$[l] = \begin{cases} \sqrt{\frac{-C_1}{B_1}}, & \text{если } A_1 = 0, \\ \sqrt{\frac{1}{2A_1} (-B_1 + \sqrt{B_1^2 - 4A_1 C_1})}, & \text{если } A_1 \neq 0. \end{cases} \quad (8)$$

Поскольку площадь S_0 не полностью покрыта стеблями и корневищами, формулу (6) надо скорректировать, вычислив, во-первых, вероятность

$$p_n = \frac{S_\phi}{S_0},$$

где S_ϕ - фактическая площадь проекции стеблей на горизонтальную поверхность, уточняемая экспериментально.

Во-вторых, согласно формуле произведения случайных событий:

$$C = AB,$$

которое состоит в наступлении обоих событий А и В, определяем скорректированную вероятность

$$P_{ск}(l \geq [l]) = p_n \cdot P(l \geq [l]). \quad (9)$$

Для построения распределения размеров измельчённых частиц вертикально расположенных корневищ

используем при схеме встречного фрезерования формулы (3) и (4), определяя численным методом при заданных дискретных значениях аргумента

$$x_{ej} = j \cdot \Delta x, \quad j = 0, 1, 2, \dots, k$$

ординаты y_{e1j} и y_{e2j} , а затем разности

$$l_j = \Delta y_{ej} = y_{e2j} - y_{e1j}.$$

Значения l_j представляют собой границы интервалов статистического ряда длин частиц измельчённых корневищ, а середину интервала характеризует величина

$$l_{(j)} = \frac{l_j + l_{j+1}}{2}.$$

Вероятность попадания случайной величины l в j -й интервал оцениваем, используя геометрическое определение вероятности (5), отношением

$$p_j = \frac{l_{(j)} \Delta x}{hH}.$$

Аналогично при попутном фрезеровании вычисляем размеры измельчённых корневищ, используя формулы (1) и (2).

2. Результаты исследования

Согласно исходным требованиям на разработку машины для пологового подсева трав в дернину [1, С. 190], в измельчённой почве должны преобладать комки размерами менее 2,5 см (70 % по массе), а комков размерами свыше 5,0 см не должно быть более 10 %. Следуя этим агротехническим обоснованиям степени крошения почвы, можно принять, что $[l]_1 = 0,025$ м при $P(l \geq [l]_1) = 0,3$ и

$$[l]_2 = 0,05$$
 м при $P(l \geq [l]_2) = 0,1$.

Анализ научно-технической информации об отечественных и зарубежных технологиях прямого посева

трав позволяет сделать вывод о том, что они принципиально схожи. Ими предусматривается предварительная подготовка засеваемых полос путём измельчения верхнего дернового слоя на ширину от 2 до 12 см и глубину 2...8 см. При малой ширине обрабатываемых полос перед посевом травы необходимо вносить гербициды с целью подавления конкуренции со стороны природного травостоя. Для успешного применения ресурсосберегающей и экологически состоятельной безгербицидной технологии поверхностного улучшения лугопастбищных угодий, согласно опытам, проведенным совместно с сотрудниками БГСХА, ширина обработанных полос, при которой достигается наибольшее количество и масса побегов подсеваемых трав, должна быть не менее 60 мм. Это согласуется с результатами других исследователей, которые указывают на снижение выживаемости зернобобовых трав при высеве их в более узкие бороздки, вследствие увеличения конкуренции со стороны старого травостоя. Таким образом, номинальную ширину ножей, которые крепятся к несущим дискам (плоским дисковым ножам) фрезерного барабана, принимаем $B_n = 0,025$ м.

В табл. 1 показаны результаты расчётов по формуле (8) при варьируемых относительно номинальных значений ширине ножей B_n и подаче H . В табл. 2 показаны результаты расчётов по формулам (6) и (9), если $[l] = 0,025$ м $p_n = 0,3$.

Гистограммы длин измельчённых корневищ, расположенных в дернине вертикально, показаны на рис. 3. Поскольку ширина интервалов статистического ряда в данном случае различная, эмпирическим частотам пропорциональны не площади, а высоты ступенек гистограмм.

При попутном фрезеровании, если принять те параметры конструкции и режимы работы фрезы, которые были установлены ранее с точки зрения минимизации энергоёмкости процесса [2], агротехнический допуск $[l] = 2,5$ см превышает с

1. Предельная длина $[l]$, м частиц измельчённого травостоя, вероятность превышения которой $P(l \geq [l]) = 0,1$ или $0,3$

$P(l \geq [l])$	$H, м$	$[l], м$ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ШИРИНЕ НОЖА ($B_n, м$)		
		0,020	0,025	0,030
0,1	0,015	0,024	0,028	0,033
	0,020	0,027	0,031	0,035
	0,025	0,031	0,034	0,037
0,3	0,015	0,022	0,026	0,031
	0,020	0,024	0,028	0,032
	0,025	0,028	0,031	0,034

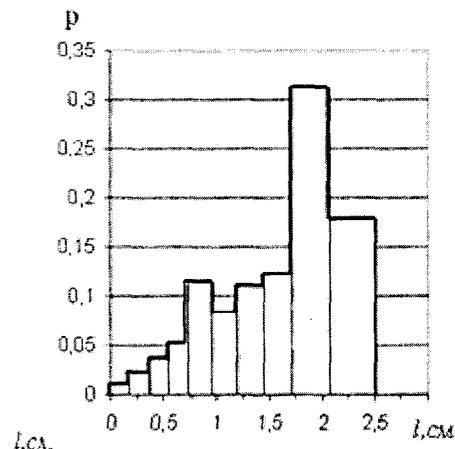
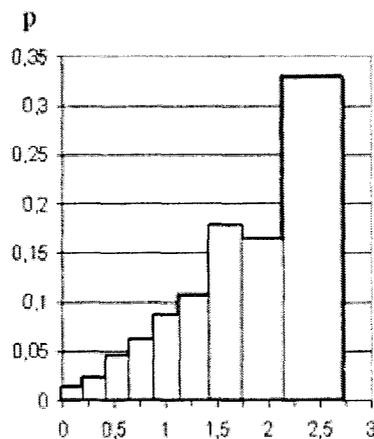
2. Вероятности превышения агротехнического допуска $[l]=0,025$ м размерами частиц измельчённого травостоя

$B_n, м$	$P(l \geq [l])$ при различной подаче на нож ($H, м$)		
	0,015	0,020	0,025
0,020	0	0,08	0,21
0,025	0,18	0,21	0,30

вероятностью $P[l \geq [l]] = 0,14$ (см.рис. 3,а), что меньше, чем предусмотрено агротехническими требованиями. Вертикально расположенные корневища лучше измельчаются при встречном фрезеровании. В этом случае (при тех же параметрах фрезерования) $l_{max} = 2,0 см < [l]$.

Если при попутном фрезеровании уменьшить поступательную скорость фрезы (вместо $v = 2,0 м/с$ принять $v = 1,7 м/с$ при тех же остальных факторах), то вероятность $P[l \geq [l]] = 0,02$ (см. рис. 3, б). Однако при этом увеличивается энергоёмкость фрезерования. Так, косвенный показатель энергоёмкости про-

Рис.3. Гистограммы длины l частиц измельчённых корневищ: а - попутное фрезерование ($h = 0,08 м$; $r = 0,25 м$; $v = 2 м/с$; $\omega = 40 рад/с$ и $z = 12$); б - то же, но $v = 1,7 м/с$



цесса фрезерования $q_{эс} = 87,65$, если $h = 0,08 м$; $r = 0,25 м$; $v = 2 м/с$; и $\omega = 40 рад/с$ $z = 12$. При тех же факторах, но $v = 1,7 м/с$, показатель $q_{эс} = 104,87$, т.е. на 19,6% больше минимального значения.

Выводы

Статистический анализ измельчения дернины в процессе фрезерования позволяет выявить, как разные факторы (параметры конструкции и режимы работы фрезы) влияют на степень измельчения корневищ. Это даёт возможность определить рациональные значения этих факторов и сокра-

тить объём экспериментальных исследований по их проверке и уточнению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исходные требования на разработку машины для подсева трав в дернину / Сборник исходных требований на тракторы и сельскохозяйственные машины. - Т. 40, М.: Госагропром, 1988.- 263 с.
2. Нагорский И.С., Азаренко В.В., Клыбик В.К. Исследование энергоёмкости фрезерования почвы / Сб.: Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве / Труды 4-й Международной научно-технической конференции // Ч.2. Энергосберегающие технологии в растениеводстве и мобильной энергетике. - М.: ГНУ ВИЭСХ, 2004.- С. 39-43.