

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЯ И МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗАНИЮ ПОЧВЫ ПРЯМЫМ ПЛАСТИНЧАТЫМ НОЖОМ ФРЕЗЫ

METHODS OF CALCULATING THE RESISTANCE AND THE MOMENT OF RESISTANCE TO CUTTING THE SOIL WITH A STRAIGHT BLADE KNIFE CUTTERS

Ю.В. КОНСТАНТИНОВ, к.т.н.

Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, Чебоксары, Россия, yuvalkons@yandex.ru

YU.V. KONSTANTINOV, PhD in Engineering

Chuvash State Agricultural Academy, Cheboksary, Russia,
yuvalkons@yandex.ru

Как известно, в процессе резания почвы пластинчатые ножи фрезы и ее ступица испытывают циклические нагрузки. Поэтому наряду с расчетом ножей на статическую прочность необходим их расчет на усталостную прочность. Для осуществления такого расчета требуется знать зависимость главного вектора сил сопротивления почвы резанию и главного момента этих сил от угла поворота фрезы. Построение методики расчета сопротивления и момента сопротивления резанию почвы пластинчатым ножом в зависимости от угла поворота фрезы и является целью настоящего исследования. Такая методика расчета разработана на основе предложенной математической модели взаимодействия лезвия ножа с почвой. Полученные аналитические зависимости включают в себя также геометрические и режимные параметры фрезы. В качестве режимных безразмерных параметров принят относительное заглубление фрезы и ее кинематический параметр, равный отношению окружной скорости конца ножа к скорости поступательного движения фрезы. Показано, что равнодействующая реакций почвы на лезвие ножа в процессе резания периодически меняет свою величину, направление и точку приложения, а максимальные значения движущей силы, модуля равнодействующей силы реакций почвы и модуля суммарного момента сопротивления почвы резанию монотонно возрастают с ростом относительного заглубления фрезы. Угол, который составляет равнодействующая силы реакций почвы с направлением движения фрезы, уменьшается почти линейно с увеличением угла ее поворота. Методика позволяет существенно упростить эксперименты по определению силовых характеристик фрезы и значительно уменьшить их объем, поскольку требует определения лишь одной эмпирической постоянной. Благодаря общности основных исходных положений предлагаемая методика может быть в основном перенесена на другие ротационные рабочие органы. Лабораторные эксперименты, проведенные в почвенном канале, подтвердили адекватность предложенной математической модели взаимодействия лезвия ножа фрезы с почвой.

Ключевые слова: фрезы, взаимодействие с почвой, результирующее сопротивление, главный момент сопротивления.

During the process of cutting the soil, the blade knives of the cutter and its hub experience cyclic loads. Therefore, along with the calculation of the knives for static strength, their calculation for fatigue strength is necessary. To carry out such a calculation, it is necessary to know the dependence of the main vector of the soil resistance forces to cutting and the main moment of these forces on the angle of rotation of the cutter. The construction of the methodology for calculating the resistance and the moment of resistance to cutting the soil with a plate knife, depending on the angle of rotation of the cutter, is the purpose of this study. Based on the proposed mathematical model of the interaction of the knife blade with the soil, such a calculation method has been developed. The obtained analytical dependences also include the geometric and operational parameters of the cutter. The relative depth of the cutter and its kinematic parameter, which is equal to the ratio of the peripheral speed of the end of the knife to the speed of the translational movement of the cutter, are taken as regime dimensionless parameters. It was shown that the resultant reaction of the soil to the knife blade during cutting periodically changes its value, direction and application point, and the maximum values of the driving force, the modulus of the resultant forces of soil reactions and the modulus of the total moment of soil resistance to cutting monotonously increase with an increase in the relative depth of the cutter. The angle, which is the resultant of the forces of soil reactions with the direction of movement of the cutter, decreases almost linearly with an increase in the angle of rotation. The technique allows to significantly simplify experiments to determine the power characteristics of the cutter and significantly reduce their volume, since it requires the determination of only one empirical constant. Due to the generality of the basic starting points, the proposed methodology can be mainly transferred to other rotational working bodies. Laboratory experiments conducted in the soil channel confirmed the adequacy of the proposed mathematical model for the interaction of the cutter blade with the soil.

Keywords: milling cutters, interaction with the soil, resulting resistance, main moment of resistance.

Введение

Ротационные рабочие органы используются в различных почвообрабатывающих машинах, поскольку они позволяют изменять в широких пределах степень крошения пласта почвы. Такие почвообрабатывающие машины позволяют обрабатывать лугоболотные, задернелые, засоренные почвы и почвы с тяжелым механическим составом, на которых машины других типов не обеспечивают выполнения агротехнических требований. Сами распространенными среди них являются фрезы, основными рабочими органами которых являются прямые и изогнутые ножи, пружинные крючки и долота. Фрезы с прямыми пластинчатыми ножами предназначены для скрификации луговой дернины, обработки новых земель с небольшой травянистой растительностью и корнями на глубину 12–15 сантиметров, где обычная вспашка может вызвать нежелательное выворачивание слоев почвы (подзолов) [1].

Для прямых ножей характерна небольшая затрата энергии на резание, малая забиваемость растительными остатками и недостаточная рыхлящая способность. Почвенная стружка при обработке этими ножами на 85–90 % образуется резанием и на 10–15 % – разрывом и скалыванием [1]. На твердых минеральных почвах прямые ножи позволяют достигать лучшего рыхления.

Проблема теоретического определения равнодействующей сил реакций почвы на лезвие ротационного рабочего органа является актуальной, поскольку, во-первых, ее решение позволяет уменьшить число дорогостоящих натурных экспериментов по определению этой равнодействующей. А во-вторых, ее решение позволяет ставить и теоретически решать задачи выбора оптимальных значений конструктивных и режимных параметров ротационного рабочего органа, что позволяет улучшать качество обработки и в конечном итоге получать более высокие урожаи различных сельскохозяйственных культур при меньших материальных затратах.

Результатирующее сопротивление и момент сопротивления резанию почвы лезвием почвообрабатывающего ротационного рабочего органа определяются распределением элементарных реакций почвы по лезвию. Одним из первых исследователей, учитывающих распределение элементарных реакций вдоль лезвия свободного дискового ножа, является профессор Нерло-Нерли [2]. Позднее многие

исследователи занимались решением аналогичных задач с различным успехом [3, 4]. Был исследован случай приводного диска-движителя [5], а затем построена обобщенная математическая модель взаимодействия диска с почвой [6]. Отметим, что эта модель позволила поставить и решить однокритериальную задачу оптимизации геометрических и режимных параметров диска [7] и двухкритериальную – для диска-движителя [8].

Направление элементарных реакций почвы на лезвие почвообрабатывающего ротационного рабочего органа зависит не только от положения его мгновенного центра вращения, но также и от угла его поворота. Поэтому равнодействующая реакций почвы на лезвие и их результатирующий момент являются функциями этого угла.

Исследования, посвященные определению сопротивления и момента сопротивления почвы резанию, сравнительно немногочисленны и имеют экспериментальный характер [9].

Цель исследования

Построение методики расчета сопротивления и момента сопротивления резанию почвы прямым пластинчатым ножом в зависимости от угла поворота фрезы и ее геометрических и режимных параметров.

Материалы и методы

Для расчета прямого пластинчатого ножа почвообрабатывающей фрезы на прочность и оптимизации процесса его функционирования необходимо построить математическую модель взаимодействия такого ножа с почвой и, в частности, определить сопротивление резанию почвы ножом и момент сопротивления почвы резанию ножом.

Предположим, что почвообрабатывающая машина или агрегат движется прямолинейно с постоянной скоростью v_0 , фреза вращается вокруг оси ступицы с постоянной угловой скоростью ω , а ее ножи при работе погружаются на максимальную глубину h в однородную почву. Режим работы фрезы характеризуется двумя постоянными безразмерными параметрами: кинематическим коэффициентом $\lambda = \omega r/v_0$ и максимальным относительным заглублением $\xi = h/r$.

Прямой нож фрезы разрезает почву, совершая плоскопараллельное движение в вертикальной плоскости. В системе координат Oxz

с центром O на оси вращения фрезы и равномерно движущейся вместе с этим ножом его положение задается углом поворота α от вертикали (рис. 1). Скорость резания почвы, переменная по ножу, определяется положением мгновенного центра скоростей фрезы, находящегося в точке $C(0; a)$, $a = r/\lambda$. Связем также с фрезой систему координат $Ox'z'$, направив ось Ox' вдоль ножа, а ось Oz' перпендикулярно оси Ox' .

На произвольный бесконечно малый элементарный участок режущей части лезвия ножа, прилегающий к точке $M'(0; z')$, длиной dz' действует элементарная сила $d\bar{R}_\perp$, направленная противоположно вектору \bar{v} абсолютной скорости этой точки (рис. 1, a). Величина этой силы равна $dR_\perp = Q \cdot dz'$, где Q – средняя удельная сила резания, приходящаяся на единицу длины лезвия.

Пусть φ – угол, образуемый $d\bar{R}_\perp$ с положительным направлением оси Ox , тогда $\cos\varphi = (z - a)/[x^2 + (z - a)^2]^{1/2}$ и $\sin\varphi = x/[x^2 + (z - a)^2]^{1/2}$, а $x = z' \cdot \sin\alpha$ и $z = -z' \cdot \cos\alpha$. Интегрируя равенство $dR_\perp = Q \cdot dz' \cdot \cos\varphi$ по отрезку режущей части лезвия и переходя к безразмерной переменной $u = \lambda z' / r$, получим горизонтальную проекцию результирующей силы сопротивления резанию (CCP):

$$R_{\perp\perp} = -\frac{Qr}{\lambda} \int_{\lambda\zeta_0}^{\lambda} \frac{(u \cos\alpha + 1)du}{\sqrt{u^2 + 2u \cos\alpha + 1}}, \quad (1)$$

где $\zeta_0 = 1 - l(\alpha, \xi)/r$, а $l(\alpha, \xi)$ – длина режущей части лезвия, соответствующая углу поворота α при максимальном заглублении лопасти h .

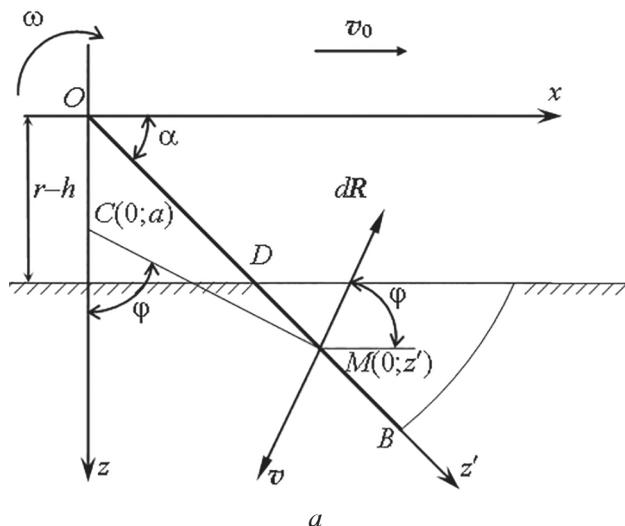


Рис. 1. Схема резания почвы лезвием ножа фрезы:
первого (a), не первого (б)

Аналогично находится вертикальная проекция этой силы:

$$R_{\perp\parallel} = -\frac{Qr}{\lambda} \int_{\lambda\zeta_0}^{\lambda} \frac{u \sin\alpha du}{\sqrt{u^2 + 2u \cos\alpha + 1}}. \quad (2)$$

Выберем за положительное направление моментов сил направление, совпадающее с направлением вращения фрезы, тогда момент относительно точки O элементарной CCP $d\bar{R}_\parallel$ будет определяться равенством $dM_O = -z \cdot dR_{\perp\parallel} + x \cdot dR_{\perp\perp}$ (рис. 1, a), интегрируя которое, найдем результирующий момент сопротивления резанию (MCP):

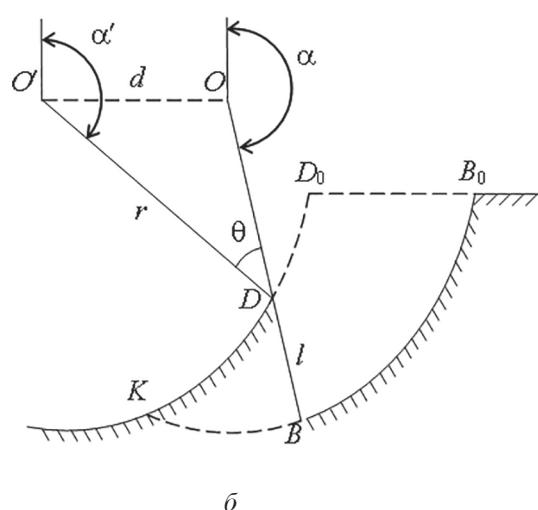
$$M_O = -\frac{Qr^2}{\lambda^2} \int_{\lambda\zeta_0}^{\lambda} \frac{u(u + \cos\alpha)du}{\sqrt{u^2 + 2u \cos\alpha + 1}}. \quad (3)$$

Интегралы в формулах (1)–(3), зависящие от α и λ как от параметров, легко вычисляются методом неопределенных коэффициентов [10]. Однако ввиду громоздкости получающихся при этом развернутых явных выражений используем способ последовательных обозначений, примененный в работах [11, 12].

Введем три функции двух переменных:

$$\begin{aligned} F_1(\alpha, u) &= (u^2 + 2u \cdot \cos\alpha + 1)^{0.5}, \\ F_2(\alpha, u) &= \ln|u + \cos\alpha + F_1(u, \alpha)|, \\ F_3(\alpha, u) &= 0.5 \cdot (u - \cos\alpha) \cdot F_1(u, \alpha). \end{aligned} \quad (4)$$

Тогда проекции результирующей CCP и суммарный момент сопротивлений почвы лезвию одного ножа примут вид:



$$\begin{aligned}
 R_{\text{Jx}} &= -Qr \cdot [G_1(\alpha, \lambda, \zeta_0) \cdot \cos \alpha + \\
 &\quad + G_2(\alpha, \lambda, \zeta_0) \cdot \sin^2 \alpha] / \lambda, \\
 R_{\text{Jz}} &= -Qr \cdot [G_1(\alpha, \lambda, \zeta_0) - \\
 &\quad - G_2(\alpha, \lambda, \zeta_0) \cdot \cos \alpha] \cdot \sin \alpha / \lambda, \\
 M_O &= -Qr^2 \cdot [G_3(\alpha, \lambda, \zeta_0) - \\
 &\quad - 0,5 \cdot G_2(\alpha, \lambda, \zeta_0) \cdot \sin^2 \alpha] / \lambda^2,
 \end{aligned} \tag{5}$$

где функции $G_i(\alpha, \lambda, \zeta_0) = F_i(\alpha, \lambda) - F_i(\alpha, \lambda, \zeta_0)$, $i = 1, 2, 3$.

Последовательные выражения (4)–(5) имеют простую структуру и не только легко программируются, но и позволяют при заданных α , λ и ζ_0 рассчитывать необходимые значения с помощью инженерного калькулятора.

Определение длины $l(\alpha, \xi)$ режущей части лезвия рассмотрено в работе [13]. На рис. 1, *a* изображен нож, входящий в почву первым (далее – первый нож). Из рисунка следует, что для него $l(\alpha, \xi) = r + (r - h) / \cos \alpha$, то есть:

$$\zeta_0 = (\xi - 1) / \cos \alpha. \tag{6}$$

Для любого ножа, входящего в почву после первого (далее – не первый нож), формула (6) справедлива лишь на начальном этапе резания. Условие $\zeta_0 = 1$ определяет угол начала резания почвы любым ножом $\alpha = \alpha_0 = \arccos(\xi - 1)$. Резание первым ножом завершается при $\alpha = 2\pi - \alpha_0$ (рис. 1, *a*). Таким образом, формулы (4)–(6) определяют результирующие силу и момент сопротивления резанию почвы первым ножом фрезы при $\alpha_0 \leq \alpha \leq 2\pi - \alpha_0$.

Из формул (1) и (3) следует, что для первого ножа горизонтальная проекция ССР и момент сопротивления почвы резанию зависят только от $\cos \alpha$, поэтому графики их зависимости от α для относительного заглубления $\xi = 0,5$

и значений $\lambda = 3; 3,5$ и 5 симметричны относительно угла $\alpha = \pi$ (рис. 2, *a*, *б*, *в*). Проекция R_{Jx} является неотрицательной, то есть сила сопротивления резанию является движущей силой. Ее вертикальная проекция (рис. 2, *б*) отрицательна при $\alpha < \pi$, и значит ССР является выглубляющей фрезу нагрузкой, а при $\alpha > \pi$ эта проекция положительна, и сопротивление резанию является заглубляющей силой. Поскольку МСР всегда является неположительным, то он тормозит вращение фрезы, и для его преодоления необходимо прикладывать к фрезе положительный момент вращения равный по абсолютной величине моменту сопротивления. Формулы (1)–(3) показывают, что максимальные значения горизонтальной проекции ССР и модуля МСР достигаются в точке $\alpha = \pi$ и, соответственно, равны $P = Q \cdot h$, $M = P \cdot (r - h/2)$, а вертикальная проекция ССР при $\alpha = \pi$ равна нулю. Эти выражения необходимо учитывать при расчете фрезы на прочность, не забывая при этом, что Q , вообще говоря, является функцией λ , которую можно определить экспериментально. Из этих формул также следует, что при вертикальном положении ножа фрезы реакции сопротивления почвы резанию заменяются равнодействующей с модулем P , направленной горизонтально в сторону движения фрезы и приложенной к лезвию в точке, расположенной на расстоянии $h/2$ от дна обработанной борозды в почве. С увеличением параметра ξ модули проекций результирующей и момента сопротивления резанию монотонно возрастают, а с увеличением λ лишь модули R_{Jx} и МСР незначительно увеличиваются, в то время как модуль R_{Jz} незначительно убывает.

Для не первого ножа формула (6) оказывается справедливой лишь до момента касания ножа верхней поверхности отрезаемой стружки

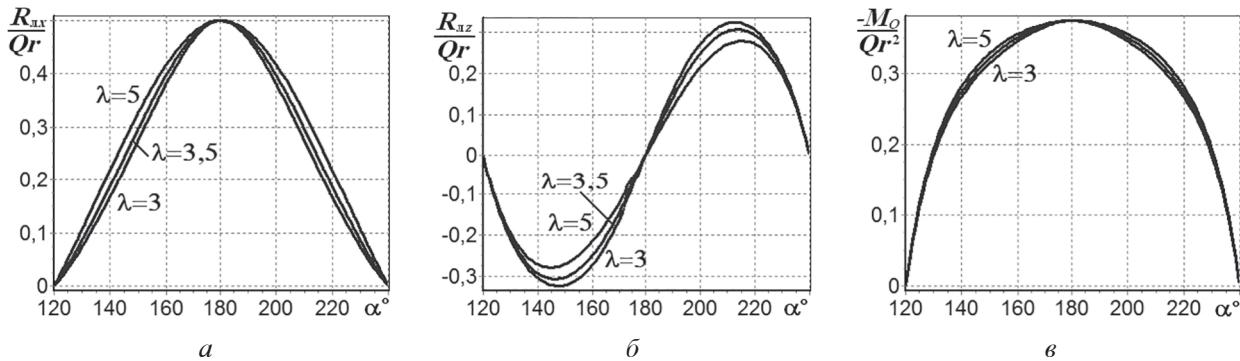


Рис. 2. Графики зависимости от угла поворота α для первого ножа:
проекций на оси Ox (*а*), Oz (*б*) результирующей силы сопротивления почвы резанию
и их суммарного момента сопротивления (*в*)

ки в точке D_0 (рис. 1, б). На завершающем этапе резания лезвие рассматриваемого ножа пересекает верхнюю поверхность стружки в некоторой точке D трохиоды, образованной предыдущим ножом. Этой точке соответствует угол α' , отложенный от вертикали в точке O' , которая расположена на горизонтальной прямой, проходящей через точку O данного ножа и лежащей на расстоянии r от точки D (рис. 1, б). При перемещении оси вращения фрезы из положения, определяемого точкой O' , в положение, задаваемое точкой O , она поворачивается на угол $2\pi/z_{\text{л}} + (\alpha - \alpha')$, а ее ось вращения проходит при этом расстояние $O'O$, равное $d = [2\pi/z_{\text{л}} + (\alpha - \alpha')]\cdot r / \lambda$, где $z_{\text{л}} = 4$ – число ножей. Из теоремы синусов для треугольника $O'DO$ (рис. 1, б) следуют равенства:

$$\begin{aligned} &[2\pi/z_{\text{л}} + (\alpha - \alpha')] \cdot \lambda^{-1} \cos \alpha + \\ &+ \sin(\alpha - \alpha') = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\xi_0 = \cos \alpha' / \cos \alpha. \quad (8)$$

Угол α' является функцией угла α , неявно заданной трансцендентным уравнением (7), которая находится с помощью его решения одним из численных методов. Подстановка этой функции в равенство (8) позволяет выразить ξ_0 через угол α . Таким образом, равенства (7), (8) и (4), (5) определяют на завершающем этапе резания результирующие силу и момент сопротивления резанию почвы не первым ножом фрезы как сложные функции от α .

Поскольку точка D_0 расположена на дневной поверхности то, если в (7) положить $\alpha' = \arccos(\xi - 1)$, получится трансцендентное уравнение для определения угла $\alpha = \alpha_1$ завершения резания дневной поверхности почвы (начального этапа) и начала резания верхней поверхности стружки (завершающего этапа), которое решается численно.

Значение угла $\alpha = \alpha_2$, соответствующее завершению резания почвы лезвием малой полуси лопасти в точке K пересечения циклоид на дне борозды (рис. 1, б), также определяется из уравнения (7). Так как в этой точке $\xi_0 = 1$, $\alpha' = 2\pi - \alpha_2$, то $\sin \alpha_2 = (\pi - \alpha_2 - \pi/z_{\text{л}})/\lambda$. Это трансцендентное уравнение также решается численно. Если в нем от угла α_2 перейти к углу $\alpha'_r = \alpha_2 - \pi$, то оно переходит в известное уравнение, определяющее положение гребней на дне борозды при работе фрезы [14].

Результаты и обсуждение

Графики зависимостей от угла α проекций результирующей ССР и модуля суммарного момента сопротивления почвы резанию лезвием не первого ножа фрезы и части соответствующих графиков для ножа, непосредственно следующего за ним, при $\xi = 0,5$ и значениях $\lambda = 3; 3,5$ и 5 приведены на рис. 3. Горизонтальная проекция ССР R_{lx} с ростом α монотонно (почти линейно) возрастает от нуля на начальном этапе резания, далее, продолжая возрастать в начале завершающего этапа (для $\lambda = 3,5$ и 5), достигает своего максимального значения и затем убывает снова до нуля. График ее зависимости от угла α терпит излом в точке перехода от первого этапа ко второму. Через период $360^\circ/z_{\text{л}} = 90^\circ$ с почвой начинает взаимодействовать лезвие следующего ножа фрезы, поэтому указанное изменение R_{lx} повторяется снова (рис. 3, а). График зависимости от α вертикальной проекции ССР R_{lz} (рис. 3, б) приближенно является объединением двух половин синусоид разных амплитуд (для $\lambda = 3$ и 3,5), причем амплитуда выглубляющего воздействия на фрезу на начальном этапе резания значительно больше амплитуды заглубляющего на завершающем этапе. Модуль МСР монотонно возрастает с ростом угла α на первом этапе

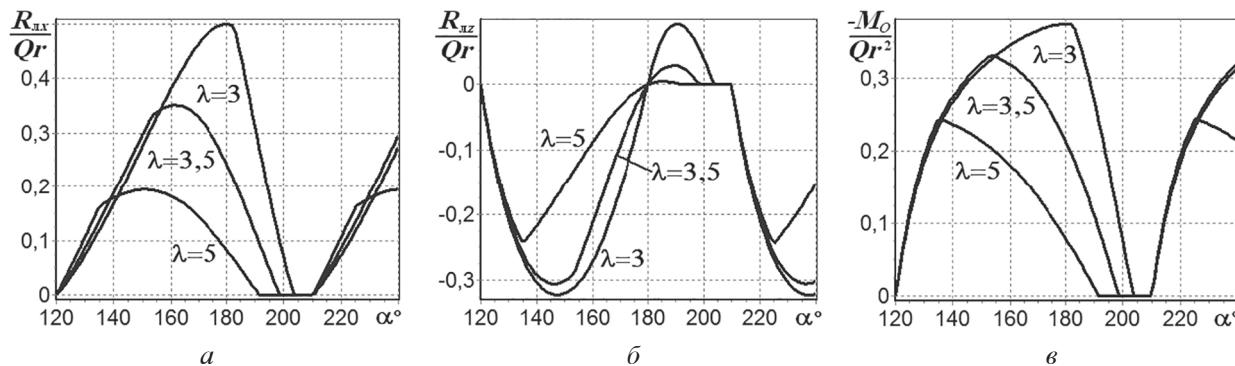


Рис. 3. Графики зависимости от угла поворота α для не первого ножа: проекций на оси Ox (а), Oz (б) результирующей силы сопротивления почвы резанию и их суммарного момента сопротивления (в)

и убывает на втором, достигая своего наибольшего значения в точке излома графика его изменения (для $\lambda = 3,5$ и 5 рис. 3, *в*). С увеличением параметра ξ максимальные значения модулей MCP и проекций CCP существенно возрастают, а с увеличением λ убывают, что объясняется соответственно увеличением и уменьшением линейных размеров стружки.

При расчете фрезы на длительную прочность нужно учитывать, что при взаимодействии с почвой второй и последующих лопастей рабочий орган испытывает циклические нагрузки, амплитуда колебаний которых меньше соответствующих наибольших значений сил и моментов при резании почвы лезвием первой лопасти. При больших значениях λ это различие амплитуд значительно.

В общем случае реакции сопротивления почвы резанию лезвием эквивалентны главному вектору, приложеному в точке O , с проекциями задаваемыми выражениями (1) и (2), и паре с главным моментом, определяемым формулой (3). Эту систему сил можно заменить одной равнодействующей, приложенной в точке лезвия, находящейся от оси вращения ротационного рабочего органа (РРО) на расстоянии $r_0 = -|M_O| / [R_{\text{л}} \cdot \cos(\alpha + \psi)]$, где $R_{\text{л}} = (R_{\text{л}x}^2 + R_{\text{л}z}^2)^{0.5}$, а $\psi = \arcsin(R_{\text{л}z} / R_{\text{л}})$ – угол, составляемый равнодействующей с положительным направлением оси Ox .

Графики зависимости r_0/r от угла α при относительном заглублении $\xi = 0,5$ для первого ножа (рис. 4, *а*) практически сливаются для значений $\lambda = 3; 3,5$ и 5. При $\alpha < \pi$ расстояние r_0 монотонно убывает от наибольшего значения $r_0 = r$ в момент касания лезвия дневной поверхности почвы до наименьшего значения $r_0 = r - h/2$ при $\alpha = \pi$, а затем возрастает до значения, равного r в момент выхода

лезвия из нее. Модуль равнодействующей $R_{\text{л}}$, при тех же самых значениях ξ и λ почти не зависящий от параметра λ , наоборот монотонно возрастает при $\alpha < \pi$ от наименьшего значения $R_{\text{л}} = 0$ до наибольшего значения P в точке $\alpha = \pi$ и затем убывает снова до нуля при $\alpha > \pi$ (рис. 4, *б*). Угол ψ , довольно слабо зависящий от λ , монотонно убывает с ростом α почти по линейному закону (рис. 4, *в*).

Поскольку при $\alpha = \pi$ для любой лопасти элементарные силы резания одинаково направлены (горизонтально) и одинаковы по величине, то они эквивалентны равнодействующей, приложенной в середине режущей части лезвия. Если мгновенный центр скоростей расположен выше дневной поверхности почвы, то из формул (1)–(3) для не первого ножа следует, что $R_{\text{л}x} = Qr(1 - \xi_1)$, $R_{\text{л}z} = 0$, $M_O = -Qr^2(1 - \xi_1^2)/2$, где $\xi_1 = \xi_0$ при $\alpha = \pi$. Следовательно, $r_0/r = (1 + \xi_1)/2$. Графики зависимости r_0/r от угла α для не первой лопасти, построенные для указанных выше значений параметров ξ и λ , показывают, что отношение r_0/r убывает на начальном этапе резания и возрастает на завершающем (рис. 5, *а*). Точка приложения равнодействующей при резании изменяет свое положение от наиболее удаленного расположения от оси вращения РРО в начале и конце процесса резания до наиболее близкого в точке перехода от первого этапа ко второму при $\alpha = \alpha_1$ (для $\lambda = 3,5$ и 5). С ростом угла α характер изменения модуля равнодействующей сил сопротивления резанию не первым ножом аналогичен характеру изменения MCP (рис. 5, *б*). Угол ψ монотонно убывает с ростом угла α (рис. 5, *в*), причем графики его зависимости от α практически совпадают с соответствующими частями графиков угла ψ для первой лопасти (рис. 4, *в*).

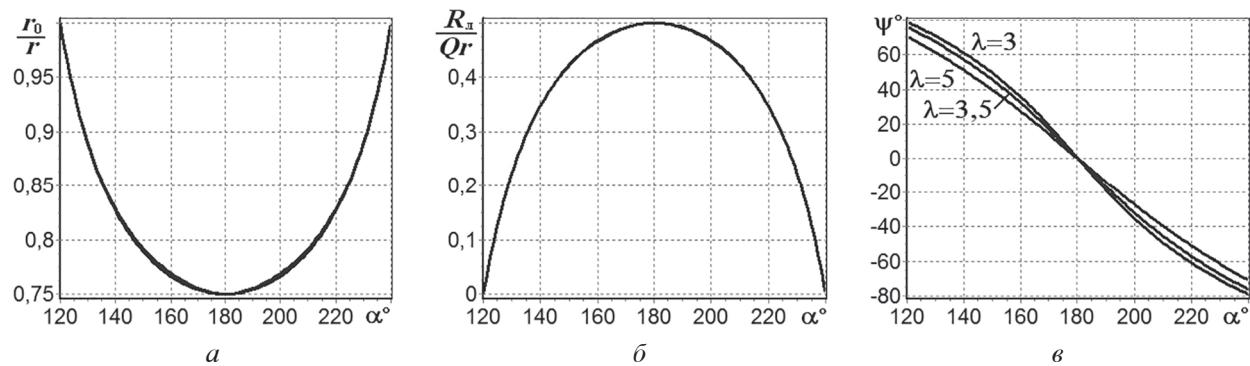


Рис. 4. Графики зависимости от угла поворота α для первого ножа: относительного расстояния от оси вращения до точки приложения равнодействующей сил сопротивления почвы резанию (*а*), ее модуля (*б*) и угла наклона (*в*)

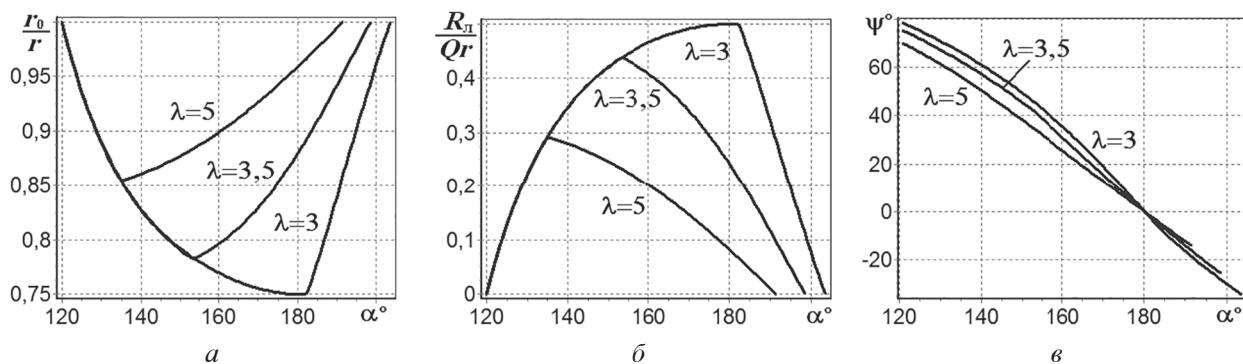


Рис. 5. Графики зависимости от угла поворота α для не первого ножа:
относительного расстояния от оси вращения до точки приложения равнодействующей сил сопротивления почвы резанию (а), ее модуля (б) и угла наклона (в)

Предложенная методика расчета результатирующих сил и моментов сопротивлений почвы резанию лезвиями ножей фрезы может использоваться и для режущих частей стоек ножей фрезы, а с некоторыми изменениями может быть перенесена и на лезвия других почвообрабатывающих ротационных рабочих органов. Эта методика позволяет упростить эксперименты, необходимые для определения результатирующих сил и моментов реакций почвы на ротационные рабочие органы, и значительно уменьшить количество этих экспериментов.

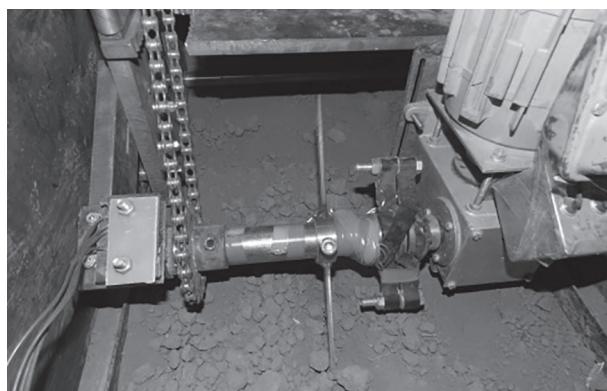


Рис. 6. Испытание прямых пластинчатых ножей в почвенном канале

С целью проверки адекватности математической модели взаимодействия прямого ножа с почвой в почвенном канале, предложенной кафедрой «Автомобили и автомобильное хозяйство» Чебоксарского института (филиала) Московского политехнического университета, были проведены лабораторные эксперименты (рис. 6). В экспериментах измерялась величина движущей силы одного прямого ножа при относительном заглублении $\xi = 0,5$ и кинематическом коэффициенте $\lambda = 3$ для различных значений угла α в трехкратной повторности.

Осредненные результаты экспериментов представлены на рис. 7. Здесь изображен график зависимости безразмерной движущей силы в зависимости от угла поворота прямого пластиначатого ножа, построенный по полученным выражениям (1), (4)–(6), а экспериментальные точки изображены кружками. Если не учитывать экспериментальные точки, соответствующие слишком малым значениям движущей силы, то, как показывают расчеты, относительная ошибка представления экспериментальных данных оказывается меньше 20 %. Таким образом, экспериментальные результаты подтверждают адекватность построенной математической модели.

Выводы

С помощью предложенной математической модели взаимодействия лезвия прямого пластиначатого ножа с почвой показано, что при резании почвы на нож и ступицу фрезы действуют циклические нагрузки. Равнодействующая

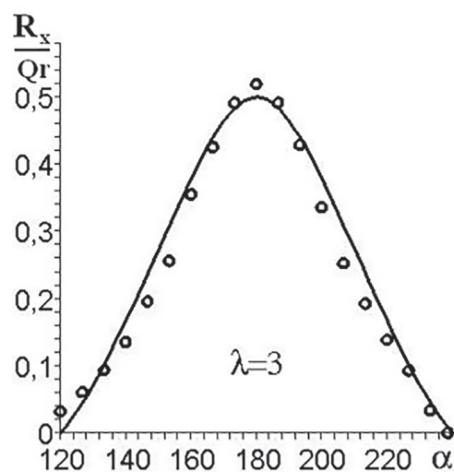


Рис. 7. График движущей силы ножа в зависимости от угла его поворота и экспериментальные точки

реакций почвы на лезвие ножа периодически меняет свою величину, направление и точку приложения с изменением угла поворота фрезы. Предложенная методика позволяет расчитывать результирующую силу сопротивления почвы резанию и результирующий момент сопротивления почвы как функции угла поворота фрезы, ее относительного заглубления и кинематического параметра.

Показано, что максимальные значения движущей силы, модуля равнодействующей сил реакций почвы и модуля суммарного момента сопротивления почвы резанию монотонно возрастают с ростом относительного заглубления фрезы при любом значении кинематического параметра. Угол, который составляет равнодействующая силы реакций почвы с направлением движения фрезы, уменьшается почти линейно с увеличением угла ее поворота.

Полученные выражения можно использовать для расчета фрезы на усталостную прочность и для выбора ее оптимальных геометрических и режимных параметров.

Построенная методика вычисления результирующей силы сопротивления почвы резанию и результирующего момента сопротивления почвы как функции угла поворота фрезы и ее параметров может использоваться для расчета силовых характеристик прямых стоек изогнутых ножей фрез, и, благодаря общности исходных положений, с некоторыми изменениями может быть перенесена на другие почвообрабатывающие ротационные рабочие органы.

Поскольку развитая методика требует определения лишь одной эмпирической постоянной, она позволяет существенно упростить эксперименты по определению силовых характеристик фрезы с прямыми пластинчатыми ножами и значительно уменьшить объем экспериментов.

Лабораторные эксперименты, проведенные в почвенном канале, подтвердили адекватность предложенной математической модели взаимодействия лезвия прямого пластинчатого ножа фрезы с почвой.

Литература

- Яцук Е.П., Панов И.М., Ефимов Д.Н., Марченко О.С., Черненков А.Д. Ротационные почвообрабатывающие машины. М.: Машиностроение, 1971. 256 с.
- Nerli N. Sul vantaggio dinamico del coltore rotante. Pisa: Pacini Mariotti, 1929. 10 p.

- Синеоков Г.Н. Дисковые рабочие органы почвообрабатывающих машин. М.: Машгиз, 1949. 86 с.
- Лучинский Н.Д. Некоторые вопросы земледельческой механики // Труды ВИМ. 1977. Т. 75. С. 3–77.
- Медведев В.И., Веденеев А.И., Акимов А.П. Методика расчета движущей силы на плоском диске-движителе // Тракторы и сельхозмашины. 1974. № 8. С. 18–20.
- Медведев В.И., Константинов Ю.В., Акимов А.П. Обобщенная математическая модель взаимодействия дискового ножа с почвой // Тракторы и сельхозмашины. 2001. № 2. С. 34–37.
- Акимов А.П., Константинов Ю.В., Аквильянова И.Н. Критерии и оптимальные параметры функционирования дискового ножа // Тракторы и сельхозмашины. 2008. № 4. С. 31–34.
- Акимов А.П., Константинов Ю.В. Рациональный выбор параметров диска-движителя почвообрабатывающего агрегата // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 10. С. 29–33.
- Matin M.A., Fielke J.M., Desbiolles J.M.A. Torque and energy characteristics for strip-tillage cultivation when cutting furrows using three designs of rotary blade // Biosystems Engineering. Vol. 129. Р. 329–340.
- Мышкис А.Д. Лекции по высшей математике. СПб.: Лань, 2009. 688 с.
- Акимов А.П., Константинов Ю.В. Математическая модель взаимодействия ротационного лопастного рабочего органа с почвой // Тракторы и сельхозмашины. 2011. № 5. С. 29–35.
- Акимов А.П., Константинов Ю.В., Федоров Д.И. Расчет мощности привода ротационного лопастного рабочего органа почвообрабатывающей машины // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 5. С. 27–32.
- Медведев В.И., Казаков Ю.Ф., Константинов Ю.В. Расчет длины режущей части лезвия почвообрабатывающего ротационного рабочего органа // Современные технологии, средства механизации и технического обслуживания в АПК: сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн. конф. Саранск: Тип. «Крас. Окт.», 2002. С. 62–68.
- Синеоков Г.Н., Панов И.М. Теория и расчет почвообрабатывающих машин. М.: Машиностроение, 1977. 328 с.

References

- YAcuk E.P., Panov I.M., Efimov D.N., Marchenko O.S., CHernenkov A.D. Rotacionnye pochvoobrabatyvayushchie mashiny [Rotary tillage machines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1971. 256 p.

2. Nerli N. Sul vantaggio dinamico del coltro rotante. Pisa: Pacini Mariotti, 1929. 10 p.
3. Sineokov G.N. Diskovye rabochie organy pochvooobrabatyvayushchih mashin [Disk working bodies of tillage machines]. Moscow: Mashgiz Publ., 1949. 86 p.
4. Luchinskij N.D. Some issues of agricultural mechanics. Trudy VIM. 1977. Vol. 75, pp. 3–77 (in Russ.).
5. Medvedev V.I., Vedeneev A.I., Akimov A.P. The methodology for calculating the driving force on a flat drive disk. Traktory i sel'hozmashiny. 1974. No 8, pp. 18–20 (in Russ.).
6. Medvedev V.I., Konstantinov YU.V., Akimov A.P. A generalized mathematical model of the interaction of a circular knife with soil. Traktory i sel'hozmashiny. 2001. No 2, pp. 34–37 (in Russ.).
7. Akimov A.P., Konstantinov YU.V., Akvil'yanova I.N. Criteria and optimal functioning parameters of a circular knife. Traktory i sel'hozmashiny. 2008. No 4, pp. 31–34 (in Russ.).
8. Akimov A.P., Konstantinov YU.V. Rational selection of parameters of the drive wheel of the tillage unit. Traktory i sel'hozmashiny. 2016. No 10, pp. 29–33 (in Russ.).
9. Matin M.A., Fielke J.M., Desbiolles J.M.A. Torque and energy characteristics for strip-tillage cultivation when cutting furrows using three designs of rotary blade // Biosystems Engineering. Vol. 129. P. 329–340.
10. Myshkis A.D. Lekcii po vysshej matematike [Higher mathematics lectures]. SPb.: Lan' Publ., 2009. 688 p.
11. Akimov A.P., Konstantinov YU.V. A mathematical model of the interaction of a rotary blade working body with soil. Traktory i sel'hozmashiny. 2011. No 5, pp. 29–35 (in Russ.).
12. Akimov A.P., Konstantinov YU.V., Fedorov D.I. Calculation of drive power of a rotary blade working body of a tillage machine. Traktory i sel'hozmashiny. 2012. No 5, pp. 27–32 (in Russ.).
13. Medvedev V.I., Kazakov YU.F., Konstantinov YU.V. Calculation of the length of the cutting part of the blade of the soil cultivating rotary working body. Sovremennye tekhnologii, sredstva mekhanizacii i tekhnicheskogo obslu-zhivaniya v APK: sb. nauch. tr. Vseros. nauch.-tekhn. konf. [Modern technologies, means of mechanization and maintenance in the agricultural sector: Collection of scientific works of All-Russian scientific and technical conference] Saransk: Tip. «Kras. Okt.», 2002, pp. 62–68 (in Russ.).
14. Sineokov G.N., Panov I.M. Teoriya i raschet pochvooobrabatyvayushchih mashin [Theory and calculation of tillage machines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1977. 328 p.