

УДК 621.878:629.114.2

Е. В. Курилов, канд. техн. наук, доц., А. С. Щербаков

К ВОПРОСУ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОСОГО РЕЗАНИЯ ГРУНТА ДИСКОВЫМ НОЖОМ

В статье предложены математическая модель процесса косо́го резания грунта дисковым ножом, критерии оценки его эффективности и метод расчёта сопротивлений резанию с учётом режима качения дискового ножа, что имеет существенное значение при проектировании таких рабочих органов.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности землеройных машин является применение рабочих органов, реализующих принцип косо́го резания грунта. Такие отвально-ковшовые рабочие органы были созданы на кафедре СДМ ЯГТУ. Отличительной особенностью этих конструкций является наличие двух симметрично установленных, свободно вращающихся дисковых ножей, производящих косо́е резание грунта [1, 2].

Вопросы теории косо́го резания грунта дисковым ножом наиболее детально разработаны применительно к рабочим органам сельскохозяйственного и лесотехнического назначения [3, 4] и в меньшей степени в области землеройных машин [5–7]. Например, М. И. Эстрин [8] исследовал процесс косо́го резания грунта жестко закреплённым дисковым ножом грейдера элеватора, а Е. Д. Галочкин [9] пришел к выводу о нецелесообразности использования дискового ножа в конструкциях рабочих органов землеройных машин.

Поэтому целью данного исследования является разработка научно обоснованных критериев оценки эффективности косо́го резания грунта дисковым ножом и метода расчёта сопротивлений резанию, что имеет существенное значение для проектирования таких рабочих органов.

Работу по отделению грунта от массива в момент его деформации и сдвига у косо́го установленного дискового ножа выполняют его режущая кромка и вогнутая сферическая боковая поверх-

ность, совершающие в пространстве сложное (винтопланетарное) движение. Кроме того, поворот ножа в плане к направлению движения приводит к изменению параметров, влияющих на процесс резания: угла резания, площади срезаемой стружки, направления движения грунтовой массы и т. д.

Для упрощения математического описания процесса принимаются следующие допущения:

- дисковый нож имеет режущую кромку без затупления;
- все распределенные элементарные силы, действующие на боковую поверхность ножа со стороны грунта, приводятся к двум равнодействующим: силе нормального давления N_p и трения F_p , которые имеют общую точку приложения, расположенную в вертикально-диаметральном сечении ножа на расстоянии, равном половине глубины его погружения в грунт;
- вектор силы трения F_p направлен в противоположную сторону вектора проекции абсолютной скорости движения точки её приложения на боковую поверхность ножа.

Действие сил N_p и F_p уравновешивается тремя внешними силами P_{01} , P_{02} , P_{03} , приложенными к оси вращения дискового ножа (рис. 1).

Задача по определению составляющих сопротивлений резанию косым клином [10] сводится к отысканию направления действия силы трения F_p в системе координат XYZ , т. к. сила N_p действует в вертикально-диаметральном сечении дискового ножа, в направлении

от центра кривизны сферической боковой поверхности к точке её приложения

под углом γ к горизонту (рис. 2).

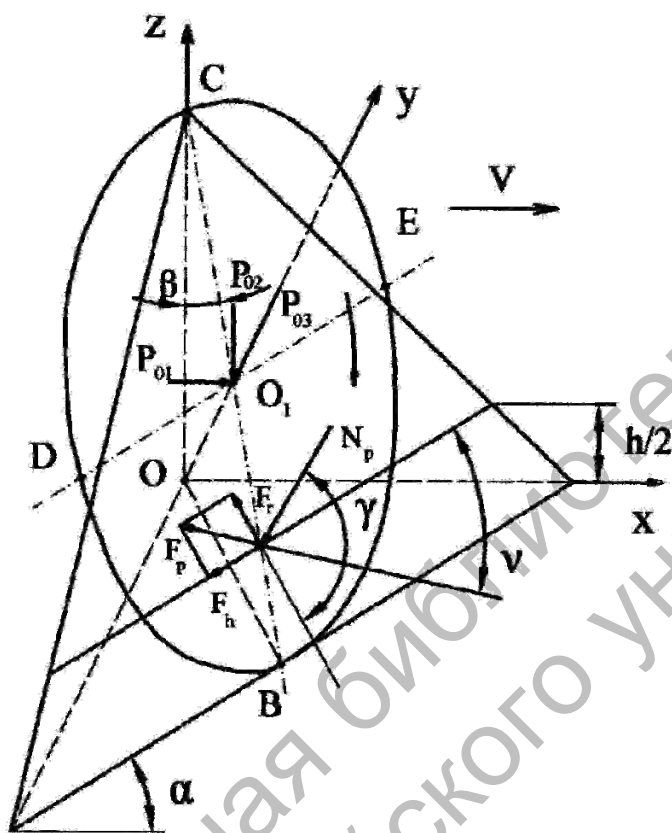


Рис. 1. Схема сил, действующих на дисковый нож

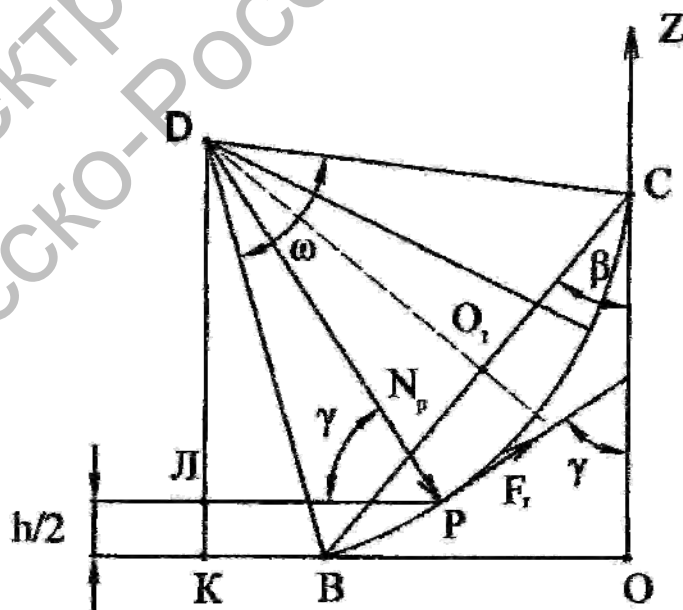


Рис. 2. Схема определения угла γ

Величина угла γ определяется из решения треугольников ВКД и РЛД:

$$\gamma = \arcsin[\sin(\omega/2 + \beta) - h/(2R)], \quad (1)$$

где ω – центральный угол сферической поверхности дискового ножа; β – угол наклона дискового ножа от вертикальной оси; h – толщина срезаемой стружки грунта; R – радиус кривизны сферической поверхности дискового ножа.

С учётом подстановок $R = d$ и $A = (h/d \cos \beta)$:

$$\gamma = \arcsin[\sin(30 + \beta) - 0,5A \cos \beta], \quad (2)$$

где d – диаметр дискового ножа.

Разложим силу F_p на горизонтальную F_h и радиальную F_r составляющие. От баланса этих сил зависит траектория перемещения грунта по боковой поверхности дискового ножа. Следовательно, для определения направления действия силы F_p необходимо определить направление вектора проекции абсолютной скорости движения её точки приложения. Кинематический анализ (рис. 3) скорости движения V_p точки приложения сил N_p и F_p не совпадает с направлением вектора поступательной скорости движения V его центра вращения и отклоняется от него на угол $\Delta\alpha$, так как составляющая скорости V_h всегда будет меньше составляющей V_1 .

С учётом того, что $\text{tg} \nu = V_2 \sin \gamma / V_h$; $V_2 = V \sin \alpha$; $V_h = V \cos \alpha [1 - \lambda(1 - A)]$,

$$\nu = \text{arctg} [\text{tg} \alpha \cdot \sin \gamma / 1 - \lambda(1 - A)], \quad (3)$$

где α – угол захвата дискового ножа к направлению движения; λ – кинематический параметр, характеризующий режим движения дискового ножа, $\lambda = r/r_\phi$; r – радиус дискового ножа; r_ϕ – фиктивный радиус дискового ножа.

Значение $\lambda = 1$ соответствует качению дискового ножа без скольжения или буксования; $0 < \lambda < 1$ – качению со скольжением; $\lambda > 1$ – качению с буксованием; $\lambda = 0$ – поступательному движению без качения.

Спроектировав действующие силы

на координатные плоскости, получим

$$\begin{cases} P_{01} = N_p \sin \alpha [\cos \gamma + \text{tg} \varphi_1 \times \\ \times (\sin \nu \cdot \sin \gamma + \text{ctg} \alpha \cdot \cos \nu)]; \\ P_{02} = N_p (\text{tg} \varphi_1 \cdot \sin \nu \cdot \cos \gamma - \sin \gamma); \\ P_{03} = N_p \cos \alpha [\cos \gamma + \text{tg} \varphi_1 \times \\ \times (\sin \nu \cdot \sin \gamma - \text{tg} \alpha \cdot \cos \nu)], \end{cases} \quad (4)$$

где P_{01} , P_{02} , P_{03} , – горизонтальная, вертикальная и боковая составляющие сопротивления резанию соответственно; φ_1 – угол внешнего трения грунта о сталь.

Тогда при известном сопротивлении P_{01} определим P_{02} и P_{03} :

$$\begin{cases} P_{02} = P_{01} \cdot m; \\ P_{03} = P_{01} \cdot n, \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} m = \frac{\text{tg} \varphi_1 \cdot \sin \nu \cdot \cos \gamma - \sin \gamma}{\sin \alpha [\cos \gamma + \text{tg} \varphi_1 (\sin \nu \cdot \sin \gamma + \text{ctg} \alpha \cdot \cos \nu)]}; \\ n = \frac{\cos \gamma + \text{tg} \varphi_1 (\sin \nu \cdot \sin \gamma - \text{tg} \alpha \cdot \cos \nu)}{\text{tg} \alpha [\cos \gamma + \text{tg} \varphi_1 (\sin \nu \cdot \sin \gamma + \text{ctg} \alpha \cdot \cos \nu)]}. \end{cases} \quad (6)$$

Известно [5], что величина силы N_p зависит только от физико-механических свойств и состояния разрабатываемого грунта. Отсюда горизонтальную составляющую сопротивления резанию определим в виде следующих уравнений:

$$P_{01} = k_{kp} \cdot k_{\nu 1} \cdot F_d; \quad (7)$$

$$P_{01} = k_p \cdot k_{\nu 2} \cdot F_d; \quad (8)$$

$$k_{\nu 2} = k_{\nu 1} \cdot k_{\nu 3}, \quad (9)$$

где k_{kp} – удельное сопротивление резанию грунта косым клином; k_p – удельное сопротивление лобовому резанию грунта; F_d – площадь поперечного сечения срезаемой стружки грунта; $k_{\nu 1}$ – коэффициент энергоёмкости, учитывающий режим движения дискового ножа; $k_{\nu 2}$ – коэффициент энергоёмкости, учитывающий переход от косого резания грунта свободно вращающимся дисковым ножом к лобовому резанию; $k_{\nu 3}$ –

коэффициент энергоёмкости, учитывающий переход от резания грунта ко-

сым клином (жестко закрепленным дисковым ножом) к лобовому.

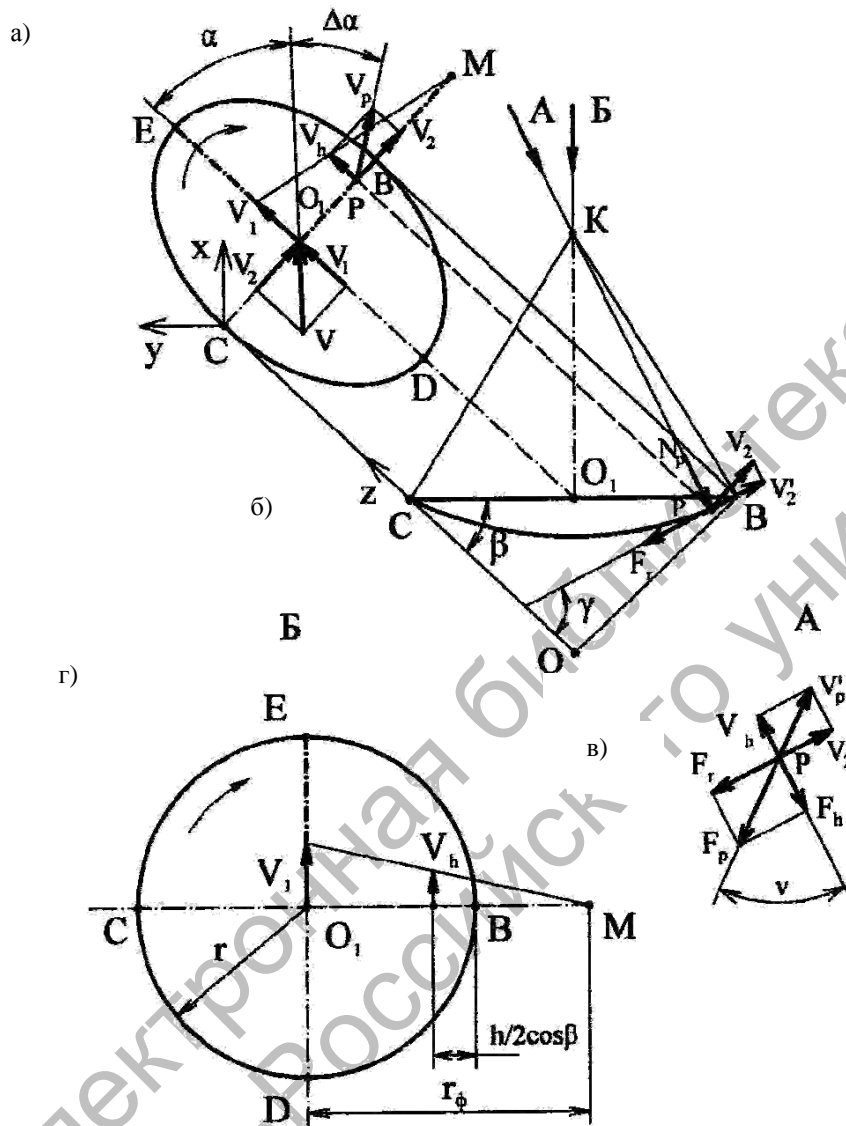


Рис. 3. Схема для определения угла v

Значения k_{31} , k_{32} и k_{33} определяются с учётом поправки на направление действия силы трения F_p свободно вращающегося дискового ножа в сравнении с резанием косым и простым клином при помощи формул (3) и (4) при $\lambda = 0$ и $\alpha = 90^\circ$:

$$k_{31} = [\cos \gamma + \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot (\sin v \cdot \sin \gamma + \operatorname{ctg} \alpha \cdot \cos v)] / [\cos \gamma + \operatorname{tg} \varphi_1 \times (\sin v' \cdot \sin \gamma + \operatorname{ctg} \alpha \cdot \cos v')]; \quad (10)$$

$$k_{32} = [\sin \alpha [\cos \gamma + \operatorname{tg} \varphi_1 \times (\sin v \cdot \sin \gamma + \operatorname{ctg} \alpha \cdot \cos v)]] / (\cos \gamma + \operatorname{tg} \varphi_1 \sin \gamma); \quad (11)$$

$$k_{33} = [\sin \alpha [\cos \gamma + \operatorname{tg} \varphi_1 \times (\sin v' \cdot \sin \gamma + \operatorname{ctg} \alpha \cdot \cos v')]] / (\cos \gamma + \operatorname{tg} \varphi_1 \sin \gamma); \quad (12)$$

$$v' = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg} \alpha \cdot \sin \beta).$$

Анализ (12) показывает, что энергоёмкость косого резания грунта жестко

закреплённым дисковым ножом при равных прочих условиях зависит от угла захвата α , что хорошо согласуется с экспериментальными данными по косому резанию грунтов, полученными в

ЦНИИС И. А. Недорезовым [5]. Для сравнения произведём расчёт k_{33} при $\alpha = 30 \dots 90^\circ$, $\gamma = 50^\circ$, $\text{tg } \varphi_1 = 0,6$ (результаты которого представлены в табл. 1).

Табл. 1. Результаты расчета k_{33}

α , град	90	75	60	45	30
По данным ЦНИИС	1	1	1	0,83	0,79
Расчетное по формуле (12)	1	0,99	0,96	0,83	0,81

Для выявления значимых факторов, влияющих на процесс косого резания грунта дисковым ножом, был произведён расчёт коэффициентов энергоёмкости по формулам (10)–(12) на ЭВМ при условии, что: $R = d$; $A = 0,05 \dots 0,25$; $\lambda = 0,7 \dots 1,1$; $\alpha = 25 \dots 45^\circ$; $\beta = 0 \dots 40^\circ$ и $\text{tg } \varphi_1 = 0,6$.

В результате аппроксимации расчётных значений коэффициентов k_{31} , k_{32} , k_{33} были получены уравнения регрессии с достаточно высокой для инженерных расчётов корреляционной связью между параметрами в исследуемом диапазоне (квадраты коэффициентов корреляции соответственно равны 0,81; 0,92; 0,92):

$$k_{31} = 1,23 + 0,001(2\alpha - \beta) - 0,2(2,5\lambda - A); \quad (14)$$

$$k_{32} = 0,77 + 0,002(4\alpha - \beta) - 0,4(\lambda - 1,5A); \quad (15)$$

$$k_{33} = 0,68 + 0,001(7\alpha - \beta). \quad (16)$$

Из этих уравнений следует, что эффективность процесса косого резания грунта зависит от углов установки (α , β) дискового ножа, режима его качения (λ) и параметров срезаемой стружки (A). При этом доминирующими факторами являются угол захвата и режим качения дискового ножа. Это подтверждается графиками, представленными на рис. 4.

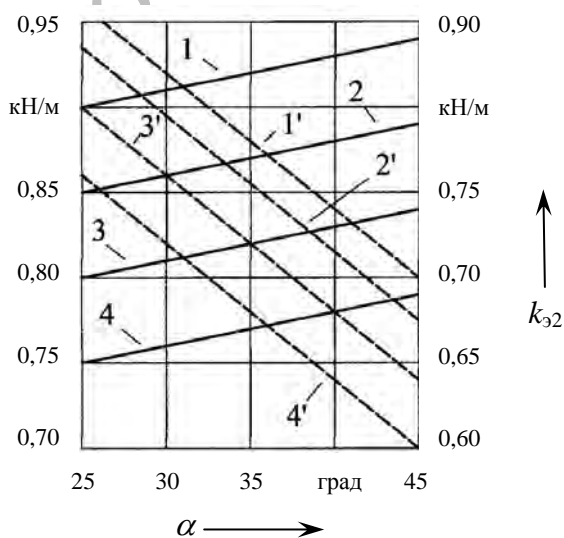


Рис. 4. Зависимости: — $k_{31} = f(\alpha)$ при $\beta = 10^\circ$; 1 — $\lambda = 0,8$; 2 — $\lambda = 0,9$; 3 — $\lambda = 1$; 4 — $\lambda = 1,1$; — — $k_{32} = f(\alpha)$ при $\beta = 10^\circ$; 1 — $\lambda = 0,8$; 2 — $\lambda = 0,9$; 3 — $\lambda = 1$; 4 — $\lambda = 1,1$

Из анализа графиков очевидно, что с увеличением α наблюдается рост значений k_{31} и k_{32} , т. е. возрастает энергоёмкость процесса косо́го резания грунта. Кроме того, качение дискового ножа со скольжением ($\lambda < 1$) также приводит к значительному росту энергоёмкости этого процесса (рис. 4, зависимости 1 и 2). Вместе с тем наблюдается снижение энергоёмкости (рис. 4, зависимости 3 и 4) при качении дискового ножа с буксованием ($\lambda > 1$) и без скольжения ($\lambda = 1$). Это снижение, по сравнению с лобовым резанием k_{32} , может достигать 30...40 %, а по сравнению с резанием косым клином – 15...25 %.

Следовательно, процесс косо́го резания грунта свободно вращающимся дисковым ножом отличается от процессов косо́го и лобового резания клином направлением действия силы трения на боковую поверхность ножа. При этом величина сопротивления зависит от физико-механических свойств разрабатываемого грунта, параметров срезаемой стружки, углов установки дискового

ножа, его геометрических характеристик и режима качения.

С целью проверки предложенной математической модели косо́го резания грунта дисковым ножом были проведены экспериментальные исследования этого процесса на грунтовом канале в лаборатории землеройных машин ЯГТУ.

Исследования проводились на полномасштабной модели (рис. 5), которая состоит из державки 1, соединительных звеньев 2, 3, 4 с делительными секторами 5, 6 и двух симметрично установленных сферических дисковых ножей 7, 8. Также конструкция модели позволяет уравновесить боковые составляющие сопротивления резанию.

Техническая характеристика модели:

Дисковый нож:
 диаметр, м.....0,4
 радиус кривизны, м.....0,4
 Углы установки дискового ножа:
 угол захвата, град.....15...55
 угол наклона, град.....15...55.

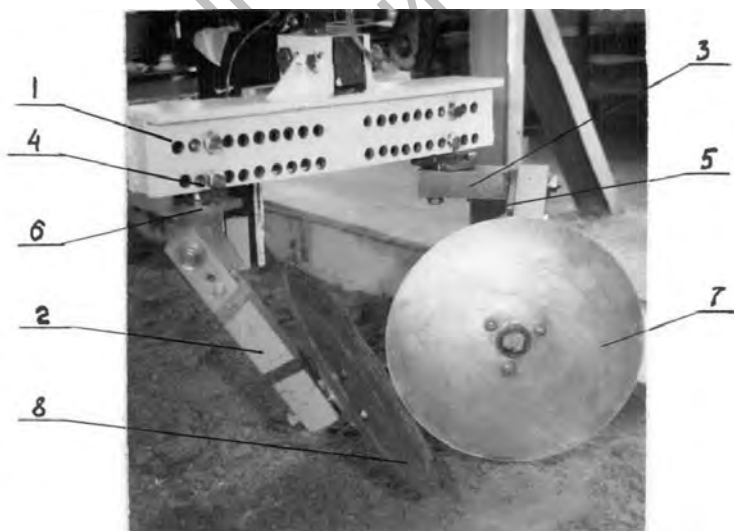


Рис. 5. Общий вид модели

Первоначально было проведено три серии опытов с целью выявления зависимости удельного сопротивления резанию от углов установки дискового ножа. При этом изменялись углы захва-

та α в пределах от 15 до 55°, наклона β – от 25 до 45° и глубина резания h – от 0,02 до 0,1 м.

Опыты проводились на супеси объемной массой 2000 кг/м³, влажно-

стью 10...12 %, с числом ударов плотного ДорНИИ 5...6 при скорости резания 0,1 м/с. Повторность проведения каждого опыта составляла 3...4, а длина пути резания – 5 м. Обработка осциллограмм проводилась методом группирования по времени, а определение доверительных интервалов выполнялось со степенью надежности 0,95.

Площадь поперечного сечения срезаемой стружки грунта дисковым ножом определялась по формуле

$$F_d = 1,1d^2 \cdot A^{1,43} \sin \alpha \cdot \cos \beta, \quad (17)$$

кинематический параметр из выражения

$$\lambda = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{L \cdot \cos \alpha}, \quad (18)$$

где L – длина пути резания; n – число оборотов дискового ножа при резании на длине L .

Число оборотов дискового ножа определялось при помощи микровыключателя.

На рис. 6 представлены результаты экспериментальных исследований по определению влияния углов захвата α дискового ножа на энергоёмкость процесса резания при фиксированном значении β . Эти зависимости являются па-

раболами с явно выраженными минимумами при $\alpha = 30...40^\circ$. При этом с увеличением угла β значения удельных сопротивлений снижаются менее интенсивно. Это можно объяснить тем, что с увеличением α и β дисковый нож работает в режиме качения с возрастающим скольжением. Значение λ изменялось от 0,5 до 0,8.

В дальнейшем была проведена проверка аналитических зависимостей по определению сопротивления резанию дисковым ножом. Расчет производился с использованием шкалы удельных сопротивлений, разработанной И. А. Недорезовым [11] (для грунтов II категории $k = 0,066$ МПа, а $k_{кл} = 0,85$). Результаты сопоставления (рис. 7) экспериментальной и теоретической зависимостей дают хорошую сходимость (наибольшее отклонение составляет не более 10 %).

Результаты экспериментальных исследований подтверждают адекватность предложенной математической модели косо́го резания грунта свободно вращающимся дисковым ножом и хорошо согласуются с данными, полученными нами и другими авторами [3, 4].

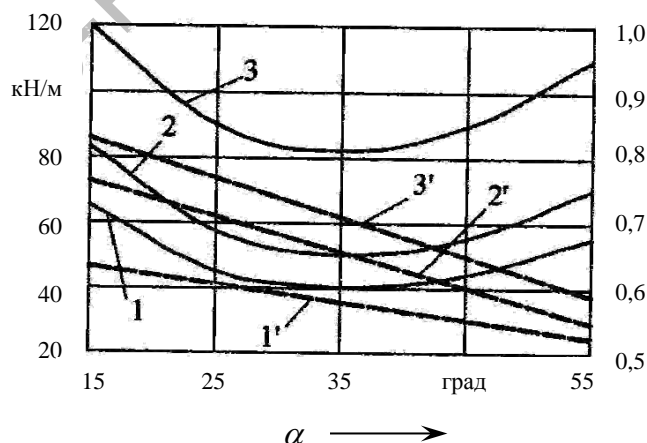


Рис. 6. Влияние угла захвата α на параметры косо́го резания грунта: — удельное сопротивление резанию k_{31} ; - - - кинематический параметр λ ; 1, 1' – $\beta = 25^\circ$; 2, 2' – $\beta = 35^\circ$; 3, 3' – $\beta = 45^\circ$; $h = 0,08$ м

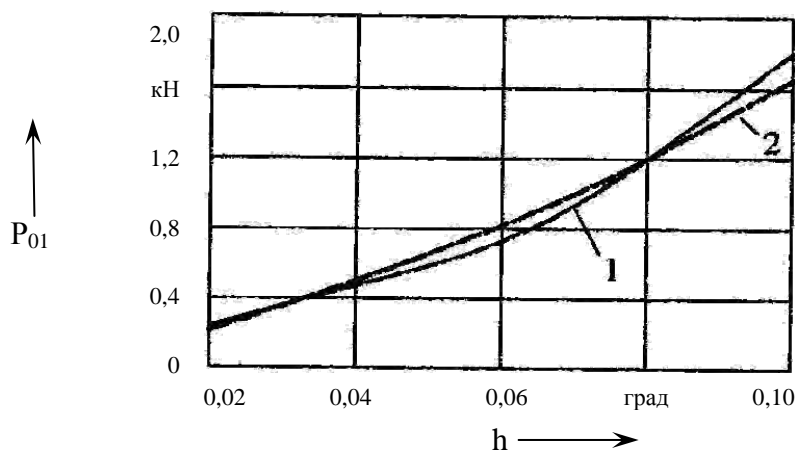


Рис. 7. Зависимость сопротивления резанию от толщины срезаемой стружки h : 1 – экспериментальная; 2 – теоретическая

В месте с тем было установлено следующее:

– эффективность косого резания грунта возрастает в диапазоне углов захвата дискового ножа от 30 до 40° , при этом снижение энергоёмкости резания достигает $30...40\%$ в сравнении с лобовым резанием;

– режим качения дискового ножа без скольжения (проскальзывания) является наиболее предпочтительным – снижение энергоёмкости достигает $15...25\%$ в сравнении с резанием жестко закреплённым дисковым ножом.

Таким образом, в результате проведённых исследований были установлены особенности процесса косого резания грунта свободно вращающимся дисковым ножом, разработаны критерии оценки эффективности этого процесса и предложена методика расчёта сопротивлений резанию. Это даёт возможность в более полном объёме использовать результаты ранее проведённых исследований землеройных стругов других авторов в области резания грунтов для решения вопросов проектирования рабочих органов землеройных машин, реализующих принцип косого резания грунта дисковым ножом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилов, Ю. М. Испытание чашечного ковша / Ю. М. Гаврилов, Е. В. Курилов, В. В. Никешин // Строительные и дорожные машины. – 1983. – № 2. – С. 5–6.
2. Гаврилов, Ю. М. Бульдозерный отвал с дисковыми секциями. Рабочие процессы и динамика машин для разработки, уплотнения грунтов и вибрационного формования изделий / Ю. М. Гаврилов, Е. В. Курилов, А. М. Сичинава // Межвуз. сб. науч. тр. – Ярославль, 1986. – С. 5–10.
3. Синеоков, Г. Н. Теория и расчёт почвообрабатывающих машин / Г. Н. Синеоков, И. М. Панов. – М.: Машиностроение, 1977. – 328 с.
4. Нартов, П. С. Дисковые почвообрабатывающие орудия / П. С. Нартов. – Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1972. – 181 с.
5. Недорезов, И. А. Исследование косого резания грунтов. Машины для земляных работ / И. А. Недорезов // Тр. ЦНИИСа. – М., 1969. – Вып. 77. – С. 28–35.
6. Зеленин, А. Н. Косое резание и копанье грунта / А. Н. Зеленин, Л. В. Красильников // Строительные и дорожные машины. – 1967. – № 4. – С. 23–24.
7. Гарбузов, З. Е. К определению нагрузок, действующих на ножевые системы / З. Е. Гарбузов // Тр. Ленинградского филиала ВНИИ стройдормаш. – Л., 1957. – Вып. 1.
8. Эстрин, М. И. О соотношении между составляющими реактивного сопротивления грунта в машинах послыоного резания / М. И. Эстрин // Тр. Ленинградского филиала ВНИИ стройдормаш. – Л., 1957. – Вып. 1. – С. 5–9.

9. **Галочкин, Е. Д.** Исследование влияния параметров дискового ножа грейдер-элеватора и режимов его работы на эффективность разработки грунтов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1953. – 12 с.

10. **Горячкин, В. П.** Собрание сочинений /

Под ред. Н. Д. Лучинского. – М. : Колос, 1968. – Т. 2. – 445 с.

11. **Недорезов, И. А.** Прогнозирование трудности разработки грунтов землеройными машинами / И. А. Недорезов // Строительные и дорожные машины. – 2008. – № 4. – С. 43–44.

Ярославский государственный технический университет
Материал поступил 12.06.2009

E. V. Kurilov, A. S. Shcherbakov
To the question of efficiency of slanting cutting the ground with a disk knife

In the article the mathematical model of the process of slanting cutting of ground with a disk knife, criteria of estimation of its efficiency and a method of calculation of resistance to cutting taking into account the rolling mode of the disk knife that has essential importance at designing such working bodies.