

С. К. МАСЮК,
кандидат технических наук, доцент

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПОЧВЫ ДИСКОВЫМИ НОЖАМИ

1. КИНЕМАТИКА ДИСКОВОГО НОЖА

Резание почвы дисковым ножом можно представить как движение колеса, имеющего очень тонкий обод, по деформирующейся поверхности с образованием колеи. Движение точек колеса можно представить как вращение его вокруг мгновенного центра вращения, положение которого определяется соотношением скоростей V_n — в поступательном движении и $V_{ок}$ — вращения вокруг оси диска.

Полную скорость V_A точки А (рис. 1) можно разложить на составляющие: V'_A — нормальную и V''_A — касательную к лезвию диска. Касательная составляющая V''_A полной скорости обозначает скорость скольжения точки А по почве без учета трения. Эта скорость направлена в сторону вращения диска и равна нулю лишь в точке О, т. е. для мгновенного центра вращения.

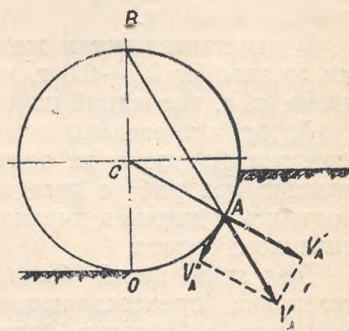


Рис. 1.

На рис. 2 показаны скорости точек лезвия, погруженных в почву. Векторы абсолютных скоростей можно разложить на два направления: касательно к лезвию и под углом трения к нормали.

Если угол α между направлением нормали к окружности и направлением полной скорости не превосходит угол трения φ лезвия по почве, то давление точки лезвия на почву будет совпадать с направлением полной скорости (точка А). В точке В, угол $\alpha > \varphi$, давление лезвия диска на почву отклонится от нормали на угол трения φ и с направлением полной скорости V_B точки В образует угол $\alpha - \varphi$.

Таблица 1

Диаметр диска D в мм	Глубина резания h в мм	Путь, пройденный диском за 20 оборотов, в м	Диаметр фиктивного диска D_f в мм	Коэффициент скольжения E в %
380	60	25,6	406	6,42
380	100	25,8	411	7,55
380	130	26,6	424	10,30
420	60	27,8	442	5,00
420	100	28,5	452	7,18
420	150	29,7	472	11,08
800	60	52,8	841	4,92
800	170	54,6	862	7,18
800	230	55,4	881	9,17
800	280	58,3	928	13,81
800	320	61,0	968	17,41

Из табл. 1 видно, что с увеличением глубины хода диска коэффициент скольжения возрастает, т. е. окружная скорость каждой точки лезвия меньше поступательной скорости центра диска. Даже при глубине хода диска меньше 0,4 г все же имеет место скольжение.

На рис. 3 показана кинематика точек лезвия диска, перемещающегося со скольжением. Движение точек лезвия диска будет таким же, как движение точек концентрического с ним диска, радиус которого будет $r + \Delta r$,

$$\Delta r = \frac{E \cdot r}{1 - E}, \quad (2)$$

где: E —коэффициент скольжения, r —радиус диска.

При этом полюс мгновенного вращения лежит на конце внешнего диаметра фиктивного диска.

Диск катится со скольжением, однако точка m на лезвии не скользит по почве и разрезает почву по направлению своей полной скорости V , так как радиусом-вектором для этой точки является касательная к окружности диска. Скорости точек, расположенных по обе стороны от точки m , составляют с радиусом некоторые углы α, α_1 , которые возрастают с увеличением расстояния от точки m в обе стороны. Поэтому полюс скорости точек n и K могут быть разложены на нормальное и касательное направления к лезвию диска.

Как видно из рис. 3, касательные составляющие скоростей точек, расположенных по обе стороны от точки m , направлены в противоположные стороны.

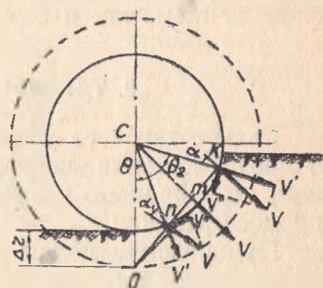


Рис. 3.

С учетом сил трения на лезвии смятие почвы лезвием будет совпадать с направлением нормальной скорости. Как указано, в точках, направление полной скорости которых составляет угол α или α_1 с нормалью, меньшей угла трения по лезвию, действие на почву будет происходить по направлению полной скорости.

Таким образом, при учете трения на лезвии не должно возникать скольжения лезвия по почве на длине дуги, лежащей внутри центрального угла $\Theta_2 - \Theta$, равного двойному углу трения почвы по лезвию.

Величину центральных углов Θ и Θ_2 можно определить по следующим зависимостям:

$$\cos(\varphi + \Theta) = \frac{r}{r + \Delta r} \cdot \cos \varphi,$$

$$\cos(\Theta_2 - \varphi) = \frac{r}{r + \Delta r} \cdot \cos \varphi,$$

откуда $\Theta_2 - \Theta = 2\varphi$. (3)

Из рассмотрения кинематики дискового ножа можно установить, что процесс резания почвы будет происходить как со скольжением, так и без скольжения.

2. ТЯГОВЫЙ РАСЧЕТ ДИСКОВОГО НОЖА

Расчет тягового усилия дискового ножа будем проводить в предположении однородности почвы на всей глубине резания, что упрощает расчет и достаточно правильно отображает процесс резания.

При резании почвы дисковым ножом на последний будет действовать реактивное сопротивление, состоящее из сопротивления почвы разрушению лезвием диска и силы трения по боковых поверхностях. Вместе с этим имеется сила трения по подшипниках дискового ножа, которую в наших расчетах мы опустим по ее малости при наличии соответствующего ухода за подшипниками.

При нормальной глубине резания (0,75 г) можно считать, как установлено выше, что диск катится со скольжением и полюс мгновенного вращения находится на некотором расстоянии Δr от нижнего конца опорного диаметра.

Реактивные сопротивления почвы на лезвии зависят от свойств разрезаемой почвы, а также от состояния лезвия дискового ножа. Однако основным фактором, влияющим на величину реактивных сил, является сам процесс резания лезвием, т. е. резание со скольжением или без скольжения.

На рис. 4 показана схема сил, действующих на дисковый нож при резании почвы на глубину h см. При этом реактив

Силы сопротивления на лезвии диска заменены их составляющими, т. е. нормальной реакцией на лезвие и силой трения по лезвию диска.

Тяговое усилие P дискового ножа будет равно сумме проекций реактивных сопротивлений на ось X и плюс сила трения T на боковых поверхностях дискового ножа:

$$P = R_x + T. \quad (4)$$

Сила трения на боковых поверхностях диска направлена горизонтально, что доказывается следующими рассуждениями.

На элементарной площадке боковой поверхности диска (рис. 5) развивается сила трения dT , величина которой зависит от нормального давления и величины коэффициента трения. Направлена сила dT перпендикулярно радиусу-вектору, соединяющему эту точку с полюсом мгновенного вращения в сторону, противоположную полной скорости данной точки.

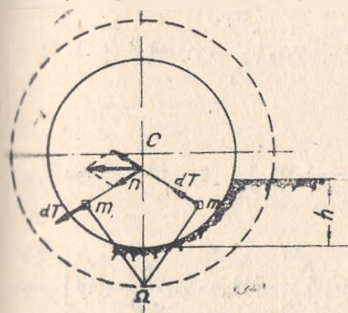


Рис. 5.

Перенесем эти силы в точку пересечения их направлений и произведем геометрическое сложение. После этого ясно видно, что результирующая элементарных сил трения симметричных площадок будет направлена горизонтально. Это является справедливым и для других симметричных площадок обеих боковых поверхностей диска. Вся же погруженная часть диска в почву является симметричной относительно вертикального диаметра. Отсюда следует, что и результирующая элементарных сил трения T будет направлена горизонтально.

Величина силы трения зависит от нормального давления на боковые поверхности и может быть определена по формуле

$$T = 2fqs, \quad (5)$$

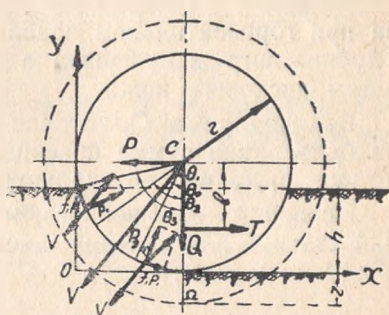


Рис. 4.

В левой части диска может быть выделена площадка m_1 , симметричная с площадкой m относительно вертикального диаметра диска. Сила dT , развивающаяся на этой площадке, тоже перпендикулярна радиусу-вектору Ωm_1 .

Перенесем эти силы в точку пересечения их направлений и произведем геометрическое сложение. После этого ясно

где: q —нормальное давление почвы на боковую поверхность диска в $кг/см^2$, s —площадь погруженной части дискового ножа в почву в $см^2$, f —коэффициент трения почвы о сталь.

Величина q может быть определена при помощи плотного ра при горизонтальном вдавливании, снабженного штампом. Глубина погружения штампа должна равняться половине толщины дискового ножа.

Величина силы Q , которая удерживает диск в почве, должна быть равна сумме проекций реактивных сопротивлений на лезвие диска на вертикальную ось.

Исходя из изложенного, можно написать систему уравнений статики для качения дискового ножа со скольжением в следующем виде:

$$\Sigma X = -P + T + rp_1 \int_{\theta_2}^{\theta_3} \sin \theta d\theta + rp_2 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta +$$

$$+ rp_1 \int_0^{\theta_1} \sin \theta d\theta - f_1 rp_1 \int_{\theta_2}^{\theta_3} \cos \theta d\theta + f_1 rp_1 \int_0^{\theta_1} \cos \theta d\theta = 0, \quad (6)$$

$$\Sigma y = -Q + rp_1 \int_{\theta_2}^{\theta_3} \cos \theta d\theta + rp_2 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \theta d\theta +$$

$$+ rp_1 \int_0^{\theta_1} \cos \theta d\theta + f_1 rp_1 \int_{\theta_2}^{\theta_3} \sin \theta d\theta - f_1 rp_1 \int_0^{\theta_1} \sin \theta d\theta = 0, \quad (7)$$

$$\Sigma M = fr \left[p_1 \int_{\theta_2}^{\theta_3} d\theta + p_2 \int_{\theta_0}^{\theta_2} d\theta - p_2 \int_{\theta_1}^{\theta_0} d\theta - p_1 \int_0^{\theta_1} d\theta \right] -$$

$$- Tl = 0. \quad (8)$$

где: f_1 —коэффициент трения почвы по лезвию, $tg \varphi = f_1$, p_1 —нормальная составляющая удельного реактивного сопротивления почвы, при котором возможно начало резания со скольжением $кг/см$, p_2 —нормальная составляющая удельного реактивного сопротивления почвы при резании лезвием без скольжения в $кг/см$, P —тяговое усилие в $кг$, T —сила трения на боковых поверхностях дискового ножа в $кг$, Q —вертикальная сила, необходимая для удержания дискового ножа в почве в $кг$.

Из уравнений (6) и (7) после интегрирования и подстановки пределов можем записать:

$$P = T + rp_1(\cos\theta_2 - \cos\theta_3) + rp_2(\cos\theta_2 - \cos\theta_1) + rp_1(1 - \cos\theta_1) + f_1rp_1(\sin\theta_2 - \sin\theta_3) + f_1rp_1 \sin\theta_1, \quad (9)$$

$$Q = rp_1(\sin\theta_3 - \sin\theta_2) + rp_2(\sin\theta_2 - \sin\theta_1) + rp_1 \sin\theta_1 + f_1rp_1(\cos\theta_3 - \cos\theta_2) + f_1rp_1 \cos\theta_1 + f_1rp_1, \quad (10)$$

Величина центральных углов $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3$ зависит от величины коэффициента скольжения, при этом они связаны следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \theta_0 - \varphi; \quad \theta_2 = \theta_0 + \varphi; \\ \cos\theta_3 &= \frac{r-h}{r}; \quad \cos\theta_0 = \frac{r}{r+\Delta r}, \end{aligned} \quad (11)$$

где: h —глубина резания дискового ножа, φ —угол трения торфа по лезвию, r —радиус дискового ножа.

Проведя замену углов θ_1 и θ_2 через углы θ_0 и θ_3 и подставив их в уравнения (8) и (9) путем замены суммы \sin и \cos через их выражения, а также после группировки членов и

$$\text{замены} \quad f_1 = \operatorname{tg}\varphi = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi}$$

будем иметь:

$$P = T + p_1 \left(h - \operatorname{tg}\varphi \sqrt{2rh - r^2} \right) + 2p_2 \frac{r^2}{r + \Delta r} \cos\varphi, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} Q &= p_1 \sqrt{2rh - h^2} + \frac{2r^2}{r + \Delta r} (p_2 - p_1) \sin\varphi + p_1 (2r - h) \operatorname{tg}\varphi + \\ &+ p_1 \frac{2r}{r + \Delta r} \sqrt{2r\Delta r + \Delta r^2} \cdot \operatorname{tg}\varphi \cdot \sin\varphi. \end{aligned} \quad (13)$$

Полученные формулы правильно отображают процесс резания торфяной почвы дисковым ножом. Так, формула (12) состоит из трех членов: первый член отображает усилие, идущее на преодоление сил трения на боковых поверхностях диска; второй член—затрату усилия на резание почвы лезвием со скольжением; третий член — затрату усилия на резание почвы лезвием без скольжения. Пользуясь формулами (12) и (13), можно определить усилие резания и вертикальную реакцию дискового ножа. При этом величина p_1 и p_2 определяется состоянием лезвия дискового ножа, а также физико-механическими свойствами почвы. Для низинного торфяника можно принять $p_1 = 0,2 \div 0,7 \text{ кг/см}$ и $p_2 = 2,1 \div 4,1 \text{ кг/см}$ в зависимости от состояния лезвия, если радиус его затупления не превышает 5 мм.

Автором были проведены специальные опыты по определению усилия резания дисковых ножей и сил трения на боковых

поверхностях в полевых условиях на участках низинного болота Минского района Минской области.

На динамометрической установке к саям прикреплялся черенковый нож толщиной 4 мм, а на тележку закреплялся по следу ножа дисковый нож диаметром 800 мм и толщиной 8 мм. Глубина установки диска была равна глубине резания ножа.

При движении установки динамометр (на 50 кг) показывал только усилия дискового ножа, который не производил разреза почвы, а испытывал только давление почвы на боковые поверхности. Другими словами, на динамограмме фиксировалась величина сил трения на боковых поверхностях дискового ножа.

Средние данные опытов приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Глубина хода h , см	32	26	18	12
Сила трения T , кг	16,7	7	5,2	4,0

Для установления влияния процесса резания со скольжением и без скольжения на величину усилия резания автором было проведено определение последнего при катящемся и заторможенном дисковом ноже.

Средние данные усилия резания (P кг) из пятикратной повторности опытов приведены в табл. 3 и 4.

Т а б л и ц а 3

Глубина резания h , см	6	12	18	25	32
Диск 800 мм, заторможенный	17	43	94	187	243
Диск 800 мм, вращающийся	12	28	54	120	160

Итак, при одинаковой силе трения на боковых поверхностях заторможенного и вращающегося дисков (табл. 3) происходит увеличение усилия резания заторможенного диска, вследствие изменения процесса резания почвы лезвием диска, а также вследствие того, что точки приложения сил трения проходят различные пути (при торможении диска большие), что влияет на величину работы. Однако, это различие (пути) незначительное и поэтому его можно опустить в первом приближении.

Данные табл. 3 и 4 показывают, что сила трения на боковых поверхностях дискового ножа составляет не более 15% от общего усилия резания.

Таблица 4

Диаметр дискового ножа D , мм	Глубина резания h , см	Тяговое усилие P , кг	Коэффициент скольжения E , %
800	6	12	5,0
800	12	28	6,91
800	18	54	8,1
800	25	120	10
800	32	160	18
420	6	18,5	5,2
420	12	37	16,81
420	16	50	12,1
380	6	21	6,4
380	12	41	10,0
380	15	50	13,42

Отклонение значений P , вычисленных по формуле (13), от полученных опытом не превышают 8%.

Из табл. 4 видно, что с увеличением диаметра диска при одинаковой глубине резания тяговое усилие уменьшается. Это можно объяснить тем, что увеличивается длина участка лезвия дискового ножа, где разрез почвы происходит со скольжением.

При одном и том же коэффициенте скольжения величина центральных углов θ_0 , θ_1 , θ_2 и θ_3 будет одинаковой, а длина дуги увеличивается с увеличением радиуса.

В результате проведенного исследования процесса резания торфяной почвы дисковым ножом установлено:

1. Дисковый нож катится в почве со скольжением, величина которого зависит от глубины резания.
2. На передней, погруженной в почву части лезвия диска имеются три области, одна из которых разрезает почву без скольжения, а две со скольжением.
3. Основной составляющей усилия резания дискового ножа является реактивное сопротивление на лезвии диска.
4. Величина усилия резания дискового ножа зависит от процесса резания почвы и уменьшается при резании со скольжением.
5. Усилие резания дискового ножа с увеличением диаметра уменьшается при прочих равных условиях.