

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИНТОВОГО РЫХЛИТЕЛЯ С ПОЧВОЙ

Мухаметшин Ильшат Сулейманович, аспирант кафедры «Эксплуатация машин и оборудования»

Валиев Айрат Расимович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация и ремонт машин»

Алешкин Алексей Владимирович, доктор технических наук, профессор

Ибяттов Равиль Ибрагимович, доктор технических наук, профессор кафедры «Физика и математика»

ФГБОУ ВО Казанский ГАУ

420015, г. Казань, ул. К.Маркса, 65 e-mail:ilshat858@gmail.com

Ключевые слова: обработка почвы, деформация, винтовой рыхлитель, связность, момент сил реакции, осевая сила реакции.

Основными критериями эффективности обработки почвы являются создание оптимальных условий для развития сельскохозяйственных культур, уничтожение сорняков и предотвращение деградации почв из-за эрозии. Для наиболее эффективного воздействия на почву, существенного изменения ее сложения применяют различные средства и способы обработки почвы. Неотъемлемым условием создания эффективных рабочих органов, обеспечивающих высокое качество обработки почвы при возможно более низкой энергоёмкости процесса, является поиск оптимальных конструктивных и технологических параметров почвообрабатывающего рабочего органа. Для простых плоских рыхлителей почвы, которыми оснащаются большинство почвообрабатывающих машин, данная задача успешно решается. В то же время, значительная доля рабочих органов сельскохозяйственных машин имеет относительно сложные рабочие органы, совершающие наряду с переносным прямолинейным движением вращательное, вокруг собственной оси. В данной статье рассмотрен процесс взаимодействия с почвой рабочего органа, который представляет собой винтовой конусный рыхлитель-почвоуглубитель на подшипниках. Рыхлитель имеет возможность свободного вращения вокруг собственной оси. Поверхность рыхлителя-почвоуглубителя описывается уравнением винтовой поверхности, ограниченной круглым конусом. Внешнее воздействие на тело рыхлителя сводится к нормальным и касательным к винтовой поверхности силам давления со стороны почвы, а также к нормальным реакциям и силам трения в подшипниках, установленных на оси вращения. Получены теоретические зависимости для определения действующей со стороны почвы на винтовую поверхность рыхлителя силы, которая возникает в процессе деформации почвенного потока до разрушения связности ее структуры. Полученные зависимости позволяют исследовать влияние конструктивных и технологических параметров винтового рабочего органа на процесс обработки почвы и обосновать их рациональные значения.

Введение

Современные тенденции развития почвообрабатывающих машин свидетельствуют о повышении интереса к реактивным рабочим органам, имеющим форму винтовой поверхности [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Это связано с наличием у них определенного ряда преимуществ. Прежде всего, рабочие органы с винтовой поверхностью позволяют уменьшить сопротивление почвы сдвигу из-за возможности возникновения крутящего момента при взаимодействии с почвой. Во время работы винтовых рабочих органов происходит непрерывное рыхление почвы и ее сдвиг в продольном и поперечном направлениях, а образование «ядра волочения» сводится к минимуму из-за переменного заднего угла резания ϵ [8, 9, 10, 11, 12].

При этом важным является определение динамических показателей рабочего органа в процессе работы, от которых зависят энергетические затраты на выполнение технологическо-

го процесса и его качество [13, 14, 15].

Целью данной работы является получение теоретических зависимостей для определения силы, действующей со стороны почвы на винтовую поверхность конусного почвоуглубителя-рыхлителя, которая возникает в процессе деформации почвенного потока, а также момента силы относительно оси вращения рабочего органа.

Объекты и методы исследований

Рабочий орган предназначен для выполнения подпахотного рыхления почвы и представляет собой смонтированный на стойке посредством подшипников винтовой конусный почвоуглубитель-рыхлитель (рис. 1), который имеет возможность вращения вокруг собственной оси при возникновении определенной силы на винте [16, 17, 18].

В соответствии с теорией почвообрабатывающих машин [13], воздействие почвы на винтовую поверхность рабочего органа мож-

но представить в виде четырёх составляющих. Первая возникает при деформации почвенного потока до разрушения связности его структуры. Вторая определяется изменением количества движения потока почвы, который в системе координат, связанной с агрегатом, набегаёт на каждый элементарный участок винтовой поверхности и после взаимодействия с ней скользит вдоль поверхности. Третья составляющая воздействия почвы обусловлена силами трения ее частиц, которые скользят по винтовой поверхности в направлении проекции начальной скорости набегающего потока на эту поверхность. Четвертая – это суммарная реакция в подшипниках, величина которой определяется как геометрическая сумма всех реакций от нормальных сил и сил трения.

В данной работе рассматривается первая составляющая силы воздействия почвы на винтовую поверхность, которая возникает при деформации почвенного потока до разрушения связности его структуры. После определения соответствующей силы и момента, действующего на рабочий орган, можно определить момент инерции рабочего органа относительно оси вращения, который будет характеризовать его способность сохранять угловую скорость в процессе работы.

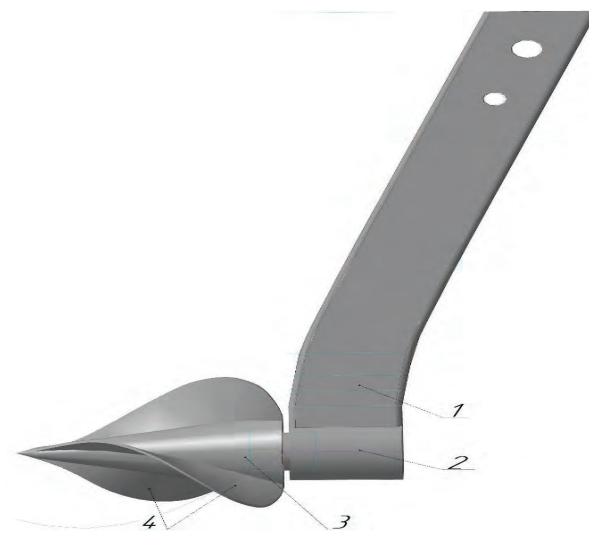
Результаты исследований

Рассмотрим вращательное движение твердого тела, которое перемещается в почве и взаимодействует с набегающим потоком, совершая сложное движение. Поступательная составляющая этого движения имеет постоянную горизонтальную скорость, равную скорости движения агрегата. В инерциальных, поступательно движущихся осях тело шарнирно закреплено на оси вращения z . Ось z наклонена к горизонту под углом $(0,5\alpha + \epsilon)$, где ϵ – угол между нижней образующей конуса почвоуглубителя-рыхлителя и горизонтальной плоскостью; ψ – угол при вершине конуса (рис. 2). Набегающий поток почвы в системе отсчета, связанной с агрегатом, отклоняется от невозмущенного движения, обтекает поверхность тела и вынуждает его поворачиваться на оси. Дифференциальное уравнение вращательного движения тела в проекции на ось вращения имеет вид [19]:

$$I \frac{d\omega}{dt} = \sum M_z$$

где I – момент инерции тела относительно

оси вращения, кг·м²; $\frac{d\omega}{dt}$ – угловое ускорение (производная от угловой скорости ω по времени



1 – стойка; 2 – подшипниковый узел; 3 – конус; 4 – винтовые крылья

Рис. 1 – Общий вид винтового конусного почвоуглубителя-рыхлителя

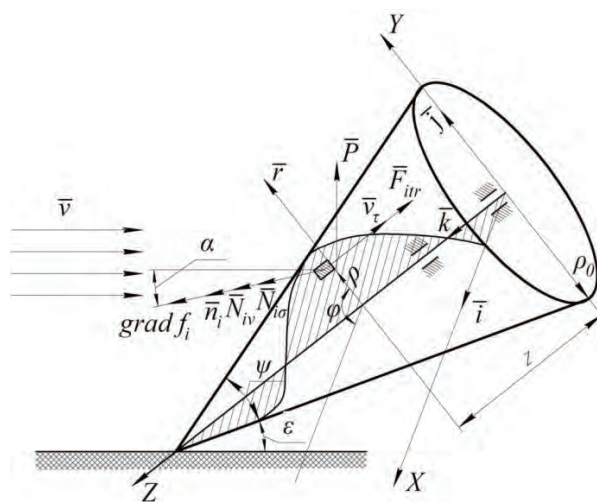


Рис. 2 – Схема винтовой поверхности почвоуглубителя-рыхлителя

t), рад/с²; $\sum M_z$ – сумма моментов всех внешних сил относительно оси z , Н·м.

Поверхность почвоуглубителя-рыхлителя описывается уравнением винтовой поверхности, ограниченной круглым конусом. Внешнее воздействие на тело почвоуглубителя-рыхлителя сводится к нормальным и касательным к винтовой поверхности силам давления со стороны почвы, а также к нормальным реакциям и силам трения в подшипниках, установленных на оси вращения. Сумма моментов всех внешних сил $\sum M_z$ относительно оси z будет положительна для правого винта, если результирующий момент сил давления почвы превысит момент сил трения в подшипниках, который, в свою очередь, определяется величиной реакций в опорах

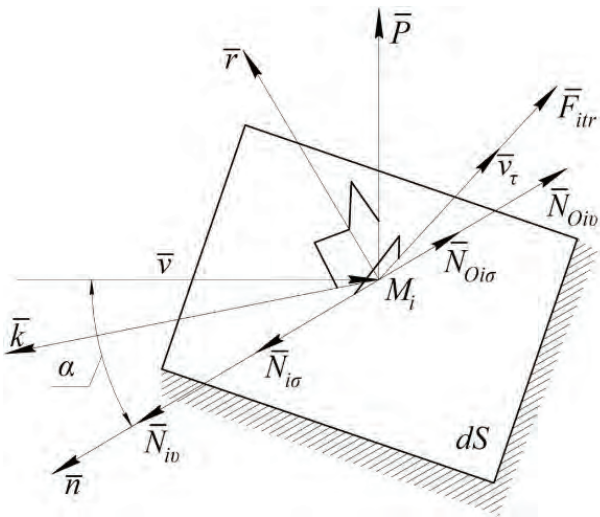


Рис. 3 – Элементарная площадка dS и силы взаимодействия с почвой

и коэффициентом трения в них. Если величина $\sum M_z$ положительна, то рыхлитель приобретает угловое ускорение в соответствии с уравнением, а после выхода на установившийся режим вращения ($\omega = const$) избыточный момент расходуется на перемешивание почвы и вовлечение примыкающих фрагментов почвы во вращательное движение.

Винтовая поверхность (рис. 2) описывается в цилиндрических координатах уравнением вида:

$$f(\rho, \varphi, z) = 0.$$

В данном случае в уравнение входят φ, z для всех ρ :

$$z - a\varphi = 0,$$

где a – коэффициент пропорциональности, определяющий шаг винта по оси z , равный $2\pi a$ и принимаемый постоянным.

Выделим на винтовой поверхности i -ую элементарную площадку dS и определим нормальную реакцию поверхности от первой составляющей – деформации почвенного потока $N_{i\sigma}$ (рис. 3). Сила нормального давления на поверхность будет равна этой реакции по величине и противоположна по направлению.

$$N_{i\sigma} = \sigma \cdot dS \cdot \cos^2(\alpha),$$

где σ – предельное напряжение сжатия почвы, Па; dS – площадь, м²; α – угол между нормалью к поверхности и направлением, противоположном скорости потока почвы, рад.

Косинус угла α взят во второй степени, так как поперечная площадь сжимаемого потока

равна $dS \cos(\alpha)$ и сжимающая сила проецируется на нормаль к поверхности через $\cos(\alpha)$.

Для определения угла α необходимо вычислить вектор-градиент к поверхности (2) и проекции скорости потока почвы на цилиндрические оси координат. Градиент определяет направление нормали к винтовой поверхности:

$$\text{grad } f(\rho, \varphi, z) = \frac{\partial f}{\partial \rho} \bar{r} + \frac{\partial f}{\partial \varphi} \bar{p} + \frac{\partial f}{\partial z} \bar{k}$$

Определим частные производные от функции

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial \rho} = 0; \\ \frac{\partial f}{\partial \varphi} = -a; \\ \frac{\partial f}{\partial z} = 1. \end{cases}$$

Тогда вектор-градиент примет следующий вид:

$$\text{grad } f(\rho, \varphi, z) = 0\bar{r} - \frac{a}{\rho} \bar{p} + \bar{k}.$$

Вычислим модуль вектора-градиента

$$|\text{grad } f(\rho, \varphi, z)| = \sqrt{\frac{a^2}{\rho^2} + 1}$$

Вектор скорости потока почвы определен в декартовой системе координат:

$$\bar{v} = v_x \bar{i} + v_y \bar{j} + v_z \bar{k},$$

где i, j, k – единичные векторы.

Причем

$$\begin{cases} v_x = 0; \\ v_y = -v \cdot \sin\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right); \\ v_z = -v \cdot \cos\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right). \end{cases}$$

Переходя к проекциям на цилиндрические оси, с учетом $v_x = 0$, получим:

$$\begin{cases} v_\rho = v_x \cdot \cos(\varphi) + v_y \cdot \sin(\varphi) = -v \cdot \sin\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right) \sin(\varphi); \\ v_\varphi = -v_x \cdot \sin(\varphi) + v_y \cdot \cos(\varphi) = -v \cdot \sin\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right) \cos(\varphi); \\ v_z = -v \cdot \cos\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right); \end{cases}$$

где v – модуль скорости потока почвы, рав-

ный скорости движения агрегата, м/с.

Следовательно, вектор скорости потока в цилиндрической системе координат примет вид:

$$\vec{v} = -v \sin\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right) \sin(\varphi) \vec{r} - v \sin\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right) \cos(\varphi) \vec{p} - v \cos\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right) \vec{k}.$$

Вычислим модуль данного вектора

$$|\vec{v}| = \sqrt{v_\rho^2 + v_\varphi^2 + v_z^2} = \sqrt{v^2 \sin^2\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right) \sin^2(\varphi) + v^2 \sin^2\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right) \cos^2(\varphi) + v^2 \cos^2\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right)} = \sqrt{v^2 \sin^2\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right) (\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi) + v^2 \cos^2\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right)}.$$

Так как $\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1$, получим:

$$|\vec{v}| = v \sqrt{\sin^2\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right) + \cos^2\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right)} = v.$$

Угол между вектором-градиентом к поверхности и скоростью потока почвы определяется на основе скалярного произведения этих векторов. Скалярное произведение равно произведению модулей этих векторов на косинус угла между ними:

$$\text{grad } f(\rho, \varphi, z) \cdot \vec{v} = |\text{grad } f(\rho, \varphi, z)| \cdot |\vec{v}| \cos(\vec{n}, \vec{v}).$$

Отсюда

$$\cos(\vec{n}, \vec{v}) = \frac{\text{grad } f(\rho, \varphi, z) \cdot \vec{v}}{|\text{grad } f(\rho, \varphi, z)| \cdot |\vec{v}|}.$$

С другой стороны, скалярное произведение можно найти как сумму произведений одноименных координат векторов и :

$$\text{grad } f(\rho, \varphi, z) \cdot \vec{v} = \frac{a}{\rho} v \sin\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right) \cos \varphi - v \cos\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right).$$

Тогда с учетом и получим:

$$\cos(\vec{n}, \vec{v}) = \frac{\sin\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right) \cos(\varphi) \cdot \left(\frac{a}{\rho}\right) - \cos\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right)}{\sqrt{\frac{a^2}{\rho^2} + 1}}.$$

Как следует из рисунка 4, величина (\vec{n}, \vec{p}) обозначает угол между положительными направлениями векторов \vec{n} и \vec{v} . Поэтому $\alpha = \pi - (\vec{n}, \vec{v})$, отсюда $(\vec{n}, \vec{v}) = \pi - \alpha$. Так как $\cos(\pi - \alpha) = -\cos \alpha$, окончательно получим:

$$\cos(\alpha) = -\frac{\sin\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right) \cos \varphi \cdot \left(\frac{a}{\rho}\right) - \cos\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right)}{\sqrt{\frac{a^2}{\rho^2} + 1}}.$$

Величина нормальной реакции элементарной площадки dS поверхности

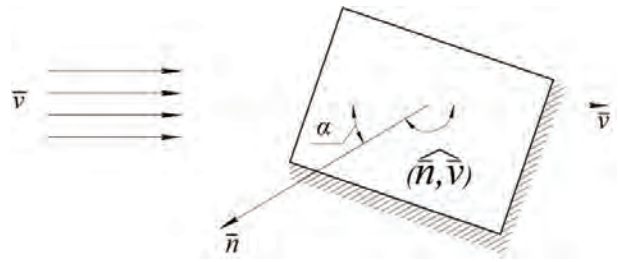


Рис. 4 – Угол между нормалью \vec{n} и направлением скорости потока \vec{v}

от деформации почвенного потока $N_{i\sigma}$ по выражению равна:

$$N_{i\sigma} = \sigma \cdot dS \cdot \left(\frac{\sin\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right) \cos(\varphi) \cdot \left(\frac{a}{\rho}\right) - \cos\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right)}{\sqrt{\frac{a^2}{\rho^2} + 1}} \right)^2.$$

Сила $N_{i\sigma}$ создает крутящий момент относительно оси вращения рабочего органа. Этот крутящий момент равен произведению проекции силы $N_{i\sigma}$ на тангенциальное направление \vec{p} и координаты ρ :

$$M_z(N_{i\sigma}) = N_{i\sigma} \cos(\vec{n}, \vec{p}) \rho.$$

Косинус угла между нормалью \vec{n} и направлением координатной оси \vec{p} определим как проекцию градиента к поверхности, деленную на его модуль:

$$\cos(\vec{n}, \vec{p}) = \frac{\frac{\partial f}{\partial \varphi} \cdot \frac{1}{\rho}}{|\text{grad } f(\rho, \varphi, z)|}.$$

С учетом и получим

$$\cos(\vec{n}, \vec{p}) = \frac{-\frac{a}{\rho}}{\sqrt{\frac{a^2}{\rho^2} + 1}}.$$

Тогда момент реакции элементарного участка поверхности относительно оси z с учетом и равен:

$$M_z(N_{i\sigma}) = \sigma \cdot dS \cdot \left(\frac{\sin\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right) \cos(\varphi) \cdot \left(\frac{a}{\rho}\right) - \cos\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right)}{\sqrt{\frac{a^2}{\rho^2} + 1}} \right)^2 \cdot \rho \cdot \left(\frac{-a}{\rho} \right) \frac{1}{\sqrt{\frac{a^2}{\rho^2} + 1}}.$$

Вычислим интеграл по винтовой поверхности, ограниченной двумя круглыми конусами, от $M_z(N_{i\sigma})$ для получения момента всех реакций $N_{i\sigma}$:

$$M_{z\sigma} = \iint_{(S)} \sigma \cdot \left(\frac{\sin\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right) \cos(\varphi) \cdot \left(\frac{a}{\rho}\right) - \cos\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right)}{\sqrt{\frac{a^2}{\rho^2} + 1}} \right)^2 \cdot \rho \cdot \left(\frac{-a}{\rho} \right) \frac{1}{\sqrt{\frac{a^2}{\rho^2} + 1}} dS.$$

Интеграл является суммой по всей площади винтовой поверхности, которая задана в параметрической форме - цилиндрических координатах. Это поверхностный интеграл первого рода [19]. Его вычисляют как кратные интегралы по области – проекции поверхности винта на конусы.

Для перехода от интеграла по dS к параметрам ρ и φ воспользуемся понятием поверхностного интеграла первого рода [19]:

$$M_{z\sigma} = \iint_{(S)} H(\rho, \varphi) dS = \iint_{(\Omega)} H(\rho, \varphi) \sqrt{EG - F^2} d\rho d\varphi,$$

где

$$H(\rho, \varphi) = \sigma \cdot \left(\frac{\sin\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right) \cos(\varphi) \cdot \left(\frac{a}{\rho}\right) - \cos\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right)}{\sqrt{\frac{a^2}{\rho^2} + 1}} \right)^2 \cdot \rho \cdot \frac{\left(-\frac{a}{\rho}\right)}{\sqrt{\frac{a^2}{\rho^2} + 1}}.$$

Здесь E , G и F – функции, содержащие частные производные от x, y, z по параметрам ρ, φ :

$$E = (x'_\rho)^2 + (y'_\rho)^2 + (z'_\rho)^2;$$

$$G = (x'_\varphi)^2 + (y'_\varphi)^2 + (z'_\varphi)^2;$$

$$F = x'_\rho x'_\varphi + y'_\rho y'_\varphi + z'_\rho z'_\varphi;$$

где W – проекция поверхности на плоскость (r, j) .

На основании уравнения поверхности (3) и связи декартовых координат с цилиндрическими получим:

$$\begin{cases} x = \rho \cdot \cos(\varphi); \\ y = \rho \cdot \sin(\varphi); \\ z = a \cdot \varphi; \end{cases}$$

$$\begin{cases} x'_\rho = \cos(\varphi); \\ y'_\rho = \sin(\varphi); \\ z'_\rho = 0; \end{cases}$$

$$\begin{cases} x'_\varphi = -\rho \cdot \sin(\varphi); \\ y'_\varphi = \rho \cdot \cos(\varphi); \\ z'_\varphi = a. \end{cases}$$

Тогда

$$\begin{aligned} E &= 1, \\ G &= \rho^2 + a^2, \\ F &= 0, \end{aligned}$$

$$\sqrt{EG - F^2} = \sqrt{\rho^2 + a^2},$$

а интеграл примет вид

$$M_{z\sigma} = \iint_{(S)} H(\rho, \varphi) \sqrt{\rho^2 + a^2} d\rho d\varphi.$$

Преобразуем двойной интеграл в кратный, расставив пределы интегрирования с учетом конусных поверхностей, которые ограничивают винтовую поверхность (рис. 5).

Пусть условный круговой конус, который ограничивает винтовую поверхность снаружи, задан уравнением:

$$z = -k(\rho - \rho_0),$$

где $k = \operatorname{ctg}\left(\frac{\psi}{2}\right) = \frac{z_0}{\rho_0}$ – угловой коэффициент; z_0 – высота конуса, м; ρ_0 – радиус основания конуса, м.

На основании винтовую поверхность зададим в виде:

$$z = a\varphi,$$

где $a = \frac{z_0}{2\pi n}$, n – количество витков.

Тогда, приравняв правые части и для верхней границы интеграла по параметру ρ , получим:

$$-k(\rho - \rho_0) = a\varphi.$$

Отсюда

$$\rho = \rho_0 - \frac{a}{k}\varphi.$$

Внутренний конус, на внешнюю часть которого завинчивается винтовая поверхность, опишется уравнением:

$$z = -k_c(\rho - \rho_c),$$

где $k_c = \operatorname{ctg}\left(\frac{\psi_c}{2}\right) = \frac{z_0}{\rho_c}$ – угловой коэффициент, ρ_c – радиус основания, м.

Тогда с учетом можно записать следующее выражение для нижней границы интеграла по параметру ρ :

$$\rho = \rho_c - \frac{a}{k_c}\varphi.$$

Итак, при составлении кратного интеграла текущий радиус ρ должен меняться от

$$\rho_c - \frac{a}{k_c} \varphi \quad \text{до} \quad \rho_0 - \frac{a}{k} \varphi.$$

Параметр φ меняется от нуля до своего конечного значения φ_k , которое зависит от количества витков. На вершине конуса $\rho = 0$, тогда из выражения имеем:

$$\varphi = \varphi_k = \rho_0 \frac{k}{a}.$$

Так как $k = \frac{z_0}{\rho_0}$ и $a = \frac{z_0}{2\pi n}$, окончательно получим $\varphi_k = 2\pi n$.

Такой же результат для конечного значения φ дает применение зависимости с учетом

$$k_c = \frac{z_0}{\rho_c}.$$

обозначения

Таким образом, при переходе к кратным интегралам параметр φ меняется от 0 до $2\pi n$.

Интеграл преобразуем к виду:

$$M_{z\sigma} = \int_0^{2\pi n} \left(\int_{\left(\rho_c - \frac{a}{k_c}\varphi\right)}^{\left(\rho_0 - \frac{a}{k}\varphi\right)} H(\rho, \varphi) \sqrt{\rho^2 + a^2} d\rho d\varphi \right).$$

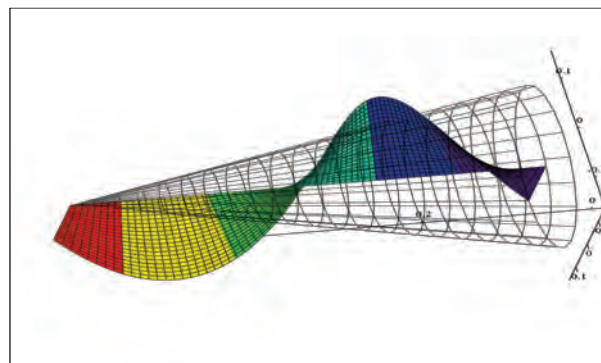
Подставив подынтегральную функцию, получим:

$$M_{z\sigma} = \int_0^{2\pi n} \left(\int_{\left(\rho_c - \frac{a}{k_c}\varphi\right)}^{\left(\rho_0 - \frac{a}{k}\varphi\right)} \sigma \cdot \frac{\sin\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right) \cos(\varphi) \cdot \left(\frac{a}{\rho}\right) - \cos\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right)}{\sqrt{\frac{a^2}{\rho^2} + 1}} \cdot \rho \cdot \frac{\left(-\frac{a}{\rho}\right)}{\sqrt{\frac{a^2}{\rho^2} + 1}} \sqrt{\rho^2 + a^2} d\rho \right) d\varphi.$$

Момент сил давления почвы на винтовую поверхность $M_{Dz\sigma}$ равен моменту от нормальных реакций поверхности, но с противоположным знаком:

$$M_{Dz\sigma} = -M_{z\sigma}.$$

Аналогично моменту определяем интеграл для реакции связи по оси z , которую можно определить, если $N_{i\sigma}$ спроецировать на ось z . Вычислим направляющий косинус нормальной реакции по отношению к единичному вектору \bar{k} :



GG.D

Рис. 5 – Винтовая поверхность и ограничивающий конус

$$\cos(\bar{n}, \bar{k}) = \frac{\frac{\partial f}{\partial z}}{|\text{grad } f(\rho, \varphi, z)|} = \frac{1}{\sqrt{\frac{a^2}{\rho^2} + 1}}.$$

Тогда интеграл по поверхности для осевой реакции примет вид:

$$N_{z\sigma} = \iint_{(S)} \sigma \left(\frac{\sin\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right) \cos(\varphi) \cdot \left(\frac{a}{\rho}\right) - \cos\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right)}{\sqrt{\frac{a^2}{\rho^2} + 1}} \right)^2 \frac{1}{\sqrt{\frac{a^2}{\rho^2} + 1}} dS.$$

Преобразуем интеграл по поверхности в двойной интеграл и расставим пределы интегрирования:

$$N_{z\sigma} = \int_0^{2\pi n} \left(\int_{\left(\rho_c - \frac{a}{k_c}\varphi\right)}^{\left(\rho_0 - \frac{a}{k}\varphi\right)} \sigma \left(\frac{\sin\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right) \cos(\varphi) \cdot \left(\frac{a}{\rho}\right) - \cos\left(\varepsilon + \frac{\psi}{2}\right)}{\sqrt{\frac{a^2}{\rho^2} + 1}} \right)^2 \frac{1}{\sqrt{\frac{a^2}{\rho^2} + 1}} \sqrt{\rho^2 + a^2} d\rho \right) d\varphi.$$

В итоге тяговое усилие, необходимое для разрушения структуры почвы,

$$N_{\text{тг1}} = N_{z\sigma} \cos\left(\frac{\psi}{2} + \varepsilon\right).$$

Радиальная составляющая реакции поверхности равна нулю, так как вектор-градиент поверхности не имеет проекции на направление вектора \bar{r} .

Выводы

Полученные теоретические зависимости позволяют определить: силу давления почвы на винтовую поверхность, которая возникает в начале деформации почвенного потока до разрушения связности ее структуры; момент силы относительно оси вращения рабочего органа; осевую силу от нормальных реакций. Вычислив интегралы при различных значениях конструктивных и технологических параметров винтового почвоуглубителя-рыхлителя, а также с учетом физических и технологических свойств почвы, можно обосновать рациональные параметры

рабочего органа.

Для более точного определения динамических показателей работы винтового рабочего органа необходимо исследовать силы, обусловленные изменением количества движения потока почвы, который набегает в процессе работы на каждый элементарный участок винтовой поверхности, и возникающие за счет трения частиц, которые скользят по рабочей поверхности винта, с учетом суммарной реакции в подшипниках.

Библиографический список

1. Москалевич, В. Пути снижения энергоемкости чизельных почвообрабатывающих рабочих органов / В. Москалевич // MOTROL. – 2009. - Выпуск 11. – С. 179-189.
2. Ahmadi, I. A power estimator for an integrated active-passive tillage machine using the laws of classical mechanics / I. Ahmadi // Soil & Tillage Research. - 2017. - № 171. – Pp. 1-8.
3. Fouda, O.A. A Spiral Rotor Tiller for Tillage Heavy and Dry Clay Soil / O.A. Fouda // J. Soil Sci. and Agric. Eng., Mansoura Univ. - 2016. - Vol. 7 (12). – Pp. 929 – 936.
4. Авт. св. 1373336 SU, МПК А01В 13/00, 35/26. Устройство для безотвальной обработки почвы / В.П. Мазяров, В.И. Медведев, Г.З. Гайфуллин, Л.П. Шершевский. – №4106115/30-15; заявл. 13.05.1986; опубл. 15.02.1988, Бюл. 6.
5. Deep diggers give a high lift to yields // Farmers Weekly. – 1991. – Vol. 115, № 18. – P. 42.
6. Patent 9115937 FR, А01В 11/00. Dispositif attelé de travail de la terre comportant au moins un outil pénétrant monte pivotant autom d'un axe vertical / G. Sabourin, J. Richardeau; Soc. Ouvriere des Charrues Goizin.
7. Мазяров, В.П. Подпоровый рыхлитель значительно снижает энергозатраты при почвообработке [Электронный ресурс] / В.П. Мазяров, В.И. Медведев. - 2013. – Режим доступа: <http://www.polytech21.ru/news/1846-podpokrovnyj-rykhritel-znachitelno-snizhaet-energozatraty-pri-rochvoobrabotke>, вход свободный.
8. Акимов, А.П. Влияние параметров ротационного лопастного рабочего органа на неровность дна борозды / А.П. Акимов, Ю.В. Константинов // Тракторы и сельхозмашины. - 2015. - № 12. – С. 21-23.
9. Мударисов, С.Г. Реализация математической модели процесса взаимодействия рабочих органов с почвой при работе на склонах / С.Г. Мударисов, З.С. Рахимов, И.М. Фархутдинов // Фундаментальные основы научно-технической и технологической модернизации АПК. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Уфа: Изд-во Башкирского ГАУ, 2013. – С. 205–213.
10. Ослабление воздействия уплотненного почвенного ядра / С.А. Сидоров, В.К. Хорошенко, Д.А. Миронов, Е.С. Лужнова // Тракторы и сельхозмашины. - 2016. – № 8. – С. 30-32.
11. Мухаметшин, И.С. К анализу кинематики ротационного рабочего органа конусной формы / И.С. Мухаметшин, А.Р. Валиев // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2016. – № 2 (34). – С. 179–182.
12. Мухаметшин, И.С. Совершенствование способов и машин для предотвращения водной эрозии на склонах / И.С. Мухаметшин, Ф.Ф. Мухамедьяров, А.Р. Валиев // Наука молодых – инновационному развитию АПК. Материалы международной молодежной научно-практической конференции. Часть 1. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2016. – С. 251–259.
13. Летошнев, М.Н. Сельскохозяйственные машины. Теория, расчет, проектирование и испытание / М.Н. Летошнев. - М. - Л.: Гос. изд-во с.-х. лит., 1955. - 764 с.
14. Максимов, И.И. Энергетическая концепция эрозионной устойчивости антропогенных агроландшафтов / И.И. Максимов, В.И. Максимов. - Чебоксары: Чувашская ГСХА, 2006. – 304 с.
15. Способ и технические средства для обработки эрозионно опасных почв в условиях недостаточной влагообеспеченности / Л.З. Шарифиев, Н.Ф. Вафин, Б.Г. Зиганшин, Н.К. Мазитов // Техника и оборудование для села. - 2018. - № 2. – С. 8-11.
16. Булгариев, Г.Г. Ротационный рабочий орган для почвообрабатывающих орудий / Г.Г. Булгариев, Г.В. Пикмуллин, И.С. Мухаметшин // Scientific horizons. Materials of the I International scientific and practical conference. – Sheffield (UK): Science and Education Ltd, 2014. – Pp. 47–49.
17. Мухаметшин, И.С. Комбинированное почвообрабатывающее орудие / И.С. Мухаметшин // Сельский механизатор. - 2017. - № 6. – С. 4-5.
18. Пат. 2522320 Российская Федерация, МПК7 А01В 13/08, 33/06, 49/02. Комбинированный плуг для гладкой вспашки / И.С. Мухаметшин, А.Р. Валиев, П.И. Макаров; заявитель и патентообладатель Казанский ГАУ. – заявл. 12.02.2013; опубл. 10.07.2014, Бюл. № 19. – 10 с.
19. Ильин, В.А. Основы математического анализа. Том 2 / В.А. Ильин, Э.Г. Позняк; под ред. В.А. Ильина. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. - 464 с.

FEATURES OF SCREW RIPPER AND SOIL INTERACTION

Mukhametshin I. S., Valiev A. R., Aleshkin A. V., Ibyatov R. I.
FSBEI HE Kazan SAU
420015, Kazan, Karl Marx st., 65 e-mail: ilshat858@gmail.com

Key words: tillage, deformation, screw ripper, coherence, moment of reaction forces, axial reaction force.

The main criteria of tillage effectiveness are appropriate conditions for development of crops, weed destruction and the prevention of soil degradation due to erosion. For the most effective impact on the soil, a significant change in its composition, various means and methods of tillage are used. An essential condition for development of effective working bodies that ensure high quality tillage with the lowest possible energy intensity is the search for suitable design and technological parameters of the soil-cultivating working body. For simple flat soil rippers, which the majority of tillage machines have, this problem is successfully solved. At the same time, a significant proportion of the working bodies of agricultural machines have relatively complex working bodies, which, along with direct movement, perform rotational motion around their own axis. This article describes the process of interaction of the working body with the soil, which is presented by a helical conical ripper-subsoiler on bearings. The ripper has the ability to freely rotate around its own axis. The surface of the ripper-subsoiler is described by the equation of the helical surface restricted by a circular cone. The external impact on the ripper body is characterized by normal and tangential to the screw surface pressure forces from the soil, as well as normal reactions and friction forces in bearings mounted on the rotation axis. Theoretical dependences are obtained for specification of the force acting from the soil on the screw surface of the ripper, which arises in the process of deformation of the soil flow until its structure is destroyed. The dependences obtained allow us to investigate the influence of the constructive and technological parameters of the screw working organ on the tillage process and justify their rational values.

Bibliography

1. Moskalevich, V. Ways to reduce the energy intensity of chisel tillage workers / V. Moskalevich // MOTROL. - 2009. - Issue 11. - P. 179-189.
2. Ahmadi, I. A power estimator for an integrated active-passive tillage machine using the laws of classical mechanics / I. Ahmadi // Soil & Tillage Research. - 2017. - № 171. - Pp. 1-8.
3. Fouda, O.A. A Spiral Rotor Tiller for Tillage Heavy and Dry Clay Soil / O.A. Fouda // J. Soil Sci. and Agric. Eng., Mansoura Univ. - 2016. - Vol. 7 (12). - Pp. 929–936.
4. Auth. St. 1373336 SU, IPC A01B 13/00, 35/26. Device for subsurface tillage / V.P. Mazyarov, V.I. Medvedev, G.Z. Gaifullin, L.P. Shershevsky. - № 4106115 / 30-15; appl. 13.05.1986; publ. 15.02.1988, Bul. 6
5. Deep diggers give a high lift to yields // Farmers Weekly. - 1991. - Vol. 115, № 18. - P. 42.
6. Patent 9115937 FR, A01B 11/00. Dispositif attelé de travail de la terre comportant au moins un outil penetrant monte pivotant autom d'un axe vertical / G. Sabourin, J. Richardeau; Soc. Ouvriere des Charrues Goizin.
7. Mazyarov, V.P. The sub-cover ripper significantly reduces energy consumption during tillage [Electronic resource] / V.P. Mazyarov, V.I. Medvedev. - 2013. - Mode of access: <http://www.polytech21.ru/news/1846-podpokrovnyj-rykhlytel-znachitelno-snizhaet-energozatraty-pri-pochvoobrabotke>, admission is free.
8. Akimov, A.P. The influence of the parameters of the rotary blade working body on the unevenness of the furrow bottom / A.P. Akimov, Yu.V. Konstantinov // Tractors and agricultural machinery. - 2015. - № 12. - P. 21-23.
9. Mudarisov, S.G. Realization of the mathematical model of the process of interaction between the working bodies and the soil when working on slopes / S.G. Mudarisov, Z.S. Rakhimov, I.M. Farkhutdinov // Fundamental bases of scientific, technical and technological improvement of the agroindustrial complex. Materials of the All-Russian scientific-practical conference. - Ufa: Publishing house of Bashkir State Agrarian University, 2013. - P. 205–213.
10. The weakening of the compacted soil core / S.A. Sidorov, V.K. Khoroshenkov, D.A. Mironov, E.S. Luzhnova // Tractors and agricultural machinery. - 2016. - № 8. - P. 30-32.
11. Mukhametshin, I.S. To the analysis of the kinematics of a rotary working body of a conical form / I.S. Mukhametshin, A.R. Valiev // Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy. - 2016. - № 2 (34). - P. 179-182.
12. Mukhametshin, I.S. Improving methods and machines to prevent water erosion on slopes / I.S. Mukhametshin, F.F. Mukhamadyarov, A.R. Valiev // Science of the Young - to innovative development of the agroindustrial complex. Materials of the international youth scientific-practical conference. Part 1. - Ufa: Bashkir State Agrarian University, 2016. - P. 251–259.
13. Letoshnev, M.N. Agricultural machines. Agricultural equipment. Theory, calculation, design and testing / M.N. Letoshnev. - M. - L.: State publishing house of agricultural literature, 1955. - 764 p.
14. Maksimov, I.I. Energy concept of erosion resistance of anthropogenic agrolandscapes / I.I. Maksimov, V.I. Maximov. - Cheboksary: Chuvash State Agricultural Academy, 2006. - 304 p.
15. Method and technical means for processing of erosively dangerous soils in the conditions of insufficient moisture supply / L.Z. Sharafiev, N.F. Vafin, B.G. Ziganshin, N.K. Mazitov // Machinery and equipment for the village. - 2018. - № 2. - P. 8-11.
16. Bulgariev, G.G. Rotational working body for tillage tools / G.G. Bulgariev, G.V. Pikhmullin, I.S. Mukhametshin // Scientific horizons. Materials of the International Scientific and Practical Conference. - Sheffield (UK): Science and Education Ltd, 2014. - P. 47–49.
17. Mukhametshin, I.S. Combined tillage tool / I.S. Mukhametshin // Rural machine operator. - 2017. - № 6. - P. 4-5.
18. Pat. 2522320 Russian Federation, IPC 7 A01B 13/08, 33/06, 49/02. Combined plow for smooth plowing / I.S. Mukhametshin, A.R. Valiev, P.I. Makarov; applicant and patent owner Kazan SAU. - appl. February 12.02.2013; publ. 10.07.2014, Bul. No. 19. - 10 p.
19. Ilyin, V.A. Basics of mathematical analysis. Volume 2 / V.A. Ilyin, E.G. Pozniak; ed.by V.A. Ilyin. - M.: FIZMATLIT, 2009. - 464 p.