

ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН ПУТЕМ ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТОЙКИ РАБОЧЕГО ОРГАНА

INCREASE IN THE LEVEL OF FUNCTIONING OF AGRICULTURAL TILLAGE MACHINES BY JUSTIFYING THE PARAMETERS OF THE COLUMN OF THE WORKING BODY

С.И. КАМБУЛОВ, д.т.н.
В.Б. РЫКОВ, д.т.н.
И.В. БОЖКО, к.т.н.
В.В. КОЛЕСНИК

ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», Зерноград,
Россия, kambulov.s@mail.ru

S.I. KAMBULOV, DSc in Engineering
V.B. RYKOV, DSc in Engineering
I.V. BOZHKO, PhD in Engineering
V.V. KOLESNIK

The Federal State Budget Scientific Institution «Agrarian Science
Center «Donskoy», Zernograd, Russia, kambulov.s@mail.ru

Рабочие органы почвообрабатывающих машин выполняют наиболее важную роль с точки зрения технологического процесса обработки почвы, так как именно они обеспечивают все показатели его назначения. Цель исследования – обоснование параметров стойки рабочего органа почвообрабатывающей машины. На тяговое сопротивление как основной параметр рабочего органа оказывает влияние форма бокового профиля и поперечного сечения стойки. В общем случае в поперечном сечении стойки рабочих органов могут иметь: плоскость с прямолинейными границами, плоскость с криволинейными выпуклыми границами или плоскость с криволинейными вогнутыми границами. Уплотненное ядро почвы перед стойкой не образуется при угле заточки не более 50° . Во всех остальных случаях такое ядро образуется даже при несимметричных углах заточки. Следовательно, необходимым условием формы поперечного сечения стойки должно быть соблюдение величины указанного угла. Поперечное сечение стойки (декартов лист) отвечает предъявляемым к ней требованиям, так как угол заточки не превышает 50° , что не способствует образованию ядра уплотнения, а граница имеет форму выпуклой линии, что обеспечивает получение минимального значения абсолютной скорости, а следовательно, небольшие энергетические затраты на перемещение почвы. Стойка рабочего органа почвообрабатывающей машины должна иметь форму бокового профиля, близкую к логарифмической кривой, что снижает энергоёмкость процесса на 20...45 %. В поперечном сечении стойки должна быть плоскость, ограниченная дугами эллипса и касательными к этим дугам, проведенными таким образом, чтобы угол при вершине эллипса не превышал 50° . Это уменьшает тяговое сопротивление стойки на 40...52 %.

Ключевые слова: параметры стойки, рабочий орган, почвообрабатывающая машина, абсолютная скорость движения почвы.

The working bodies of tillers perform the most important role from the point of view of the technological process of tillage, as they provide all the parameters of its application. The purpose of the study is the justification of the parameters of the column of the working body of the tiller machine. The traction resistance as the main parameter of the working element is affected by the shape of lateral profile and cross-section of the column. In general, in the cross section, the columns of the working bodies can have: a plane with rectilinear boundaries, a plane with curvilinear convex boundaries, or a plane with curvilinear concave boundaries. The compacted core of the soil in front of the stand is not formed when the grinding angle is not more than 50° . In all other cases, such a nucleus is formed even at asymmetric sharpening angles. Consequently, the necessary condition for the shape of the cross section of the column should be the observance of the value of mentioned angle. The cross-section of the column (Folium of Descartes) meets the requirements imposed on it, as the sharpening angle does not exceed 50° , which does not contribute to the formation of the compaction core, and the boundary has the shape of a convex line, which ensures a minimum absolute speed, on soil movement. The column of the working body of the tiller machine should have the shape of a lateral profile close to the logarithmic curve, which reduces the energy intensity of the process by 20 ... 45 %, and in the cross section of the column there must be a plane bounded by arcs of the ellipse and tangent to these arcs drawn so that the angle at the top of the ellipse did not exceed 50° . This reduces the traction resistance of the column by 40 ... 52 %.

Keywords: stand parameters, working body, tillage machine, absolute speed of soil movement.

Введение

Конструкции почвообрабатывающих машин в общем случае выполнены по одинаковой схеме. Они представляют собой различные рабочие органы, которые устанавливаются на раме, опорные колеса, которые, как правило, имеют механизмы регулирования глубины хода рабочих органов и тоже устанавливаются на раме, механизмы присоединения машины к трактору и механизмы управления машиной при переводе ее из транспортного положения в рабочее и наоборот.

С точки зрения выполнения технологического процесса обработки почвы наиболее важную роль выполняют рабочие органы машины, так как именно они обеспечивают все показатели ее назначения [1, 2]. Остальные конструктивные элементы выполняют только вспомогательные функции, а некоторые из них существенно снижают качество выполнения технологических операций (например, опорные колеса уплотняют почву).

Цель исследования

Целью исследования является обоснование параметров стойки рабочего органа почвообрабатывающей машины.

Материалы и методы исследования

Форма бокового профиля стойки рабочего органа может быть установлена методами вариационного исчисления. При этом экстремальной формой стойки является кривая, близкая к логарифмической ($y = 6 \ln x$) [3, 4]. Тяговое сопротивление ножа такого профиля при работе на глубину до 20 см уменьшается на 20...54 % по сравнению с прямолинейной формой ножа.

Однако на изменение тягового сопротивления оказывает влияние не только форма бокового профиля стойки, но и форма поперечного сечения этой стойки. Вытекает это из того положения, что стойка, взаимодействуя с почвой, придает почвенным частицам определенную скорость, т.е. изменяет кинетическую энергию пласта, на что затрачивается определенная работа. Например, при работе культиватора КПЭ-3,8 почва разбрасывается стойкой на расстояние 23,3...34,3 см [5]. При этом меньшая величина соответствует скорости движения 5,9 км/ч, а большая величина – скорости 10,0 км/ч. В то же время академик В.А. Желиговский отмечал [6], что кинетическая энергия

пластов бесполезна. Необходимо найти такие рабочие поверхности, которые сами, двигаясь с большой скоростью, сообщали бы почве небольшие скорости.

Результаты исследования и их обсуждение

В общем случае в поперечном сечении стойки рабочих органов могут иметь плоскость с прямолинейными границами, плоскость с криволинейными выпуклыми границами или плоскость с криволинейными вогнутыми границами. При взаимодействии с почвой каждая из этих стоек по-разному воздействует на двигающиеся по ним частицы почвы (рис. 1), так как динамика абсолютной скорости движения частицы почвы по разным типам поверхностей

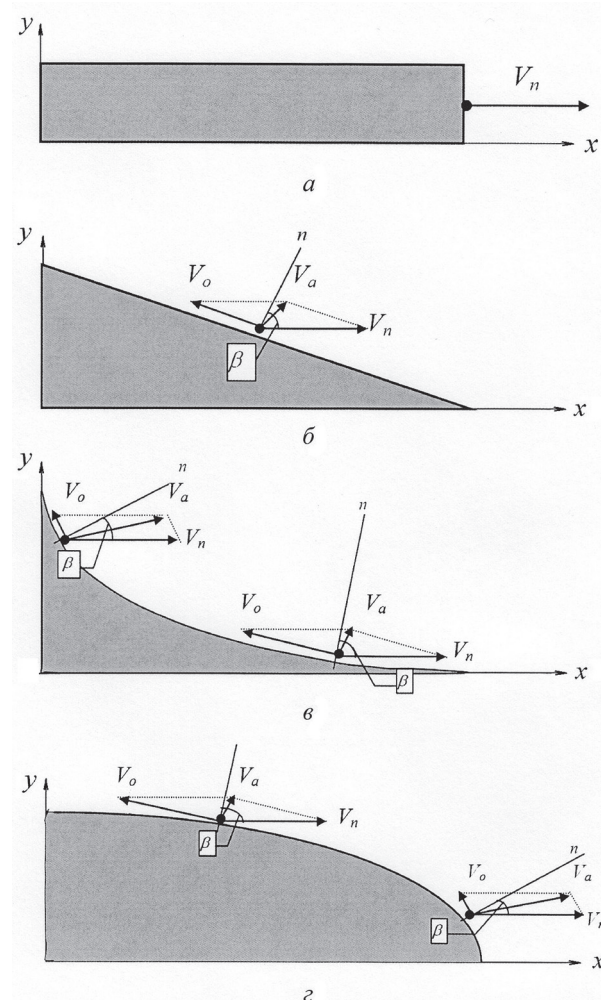


Рис. 1. Возможные варианты поперечного сечения стойки:

a – плоскость с прямолинейными границами (прямоугольник); *б* – плоскость с прямолинейными границами (ромб); *в* – плоскость с криволинейными вогнутыми границами (астероида); *г* – плоскость с криволинейными выпуклыми границами (эллипс)

неодинакова. В то же время на элементарном пути ds при любой форме поперечного сечения стойки движение частицы почвы можно представить как движение ее по поверхности трехгранного клина (рис. 2).

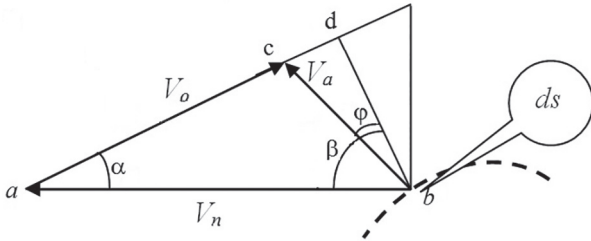


Рис. 2. Векторный треугольник скоростей перемещения почвы по поверхности клина

Из треугольников adb и cdb можно определить проекции переносной (V_n) и абсолютной (V_a) скоростей движения на нормаль db :

$$db = V_a \cos \varphi; db = V_n \cos \beta.$$

Сравнивая эти выражения, можно установить абсолютную скорость движения почвы в этой точке поверхности стойки:

$$V_a = \frac{V_n \cos \beta}{\cos \varphi}. \quad (1)$$

Таким образом, абсолютная скорость почвы зависит от переносной скорости движения стойки рабочего органа, угла β между нормалью и переносной скоростью и косинуса угла φ трения. Следовательно, для уменьшения величины этой скорости необходимо уменьшить трение и выбрать такую форму поперечного сечения стойки рабочего органа, чтобы угол β имел наибольшее значение, так как с увеличением этого угла его косинус уменьшается.

Относительная скорость V_o также может быть установлена из этих же треугольников как разность отрезков: $ad - cd$:

$$V_o = V_n \sin \beta - V_a \sin \varphi.$$

Тогда с учетом выражения (1) получим:

$$V_o = V_n \sin \beta - \frac{V_n \cos \beta \sin \varphi}{\cos \varphi} =$$

$$= V_n (\sin \beta - \cos \beta \operatorname{tg} \varphi) = V_n (\sin \beta - f \cos \beta),$$

где $f = \operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент трения почвы о материал поверхности стойки рабочего органа.

Из этого выражения видно, что при определенных условиях ($\beta = \pi/2$) относительная скорость (скорость скольжения) может быть

равна переносной скорости движения рабочего органа, и тогда частицы почвы перемещаются вместе со стойкой рабочего органа без скольжения по ней. Такое положение способствует налипанию почвы на стойку и образованию уплотненного ядра почвы, которое перемещается вместе со стойкой.

На рис. 3 приведена зависимость абсолютной скорости движения почвы от изменения угла β между переносной скоростью и нормалью и угла трения φ . При этом переносная скорость принята равной 8 км/ч. Из рис. 3 видно, что на абсолютную скорость наибольшее влияние оказывает величина угла β , а следовательно, профиль поперечного сечения стойки рабочего органа.

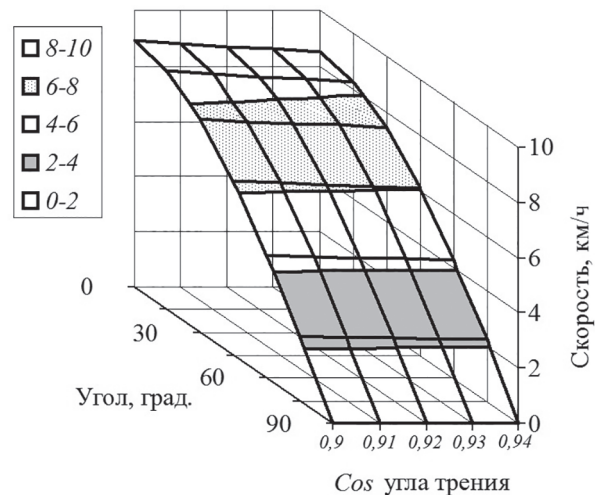


Рис. 3. Изменение абсолютной скорости почвы при взаимодействии со стойкой

На рис. 4 приведены зависимости изменения абсолютной и относительной скоростей движения почвы от угла β и переносной скорости движения. Коэффициент трения при этом принят равным $f = 0,55$, что соответствует легким суглинистым почвам, а переносная скорость изменялась в диапазоне 8...12 км/ч. Из рис. 4 видно, что абсолютная скорость изменяется от нуля до своего максимального значения. При этом минимальным значениям скорости соответствует большое значение угла β . Абсолютная скорость определяет энергоёмкость процесса обработки почвы. Желательным является, чтобы абсолютная скорость была наименьшей. В свою очередь, относительная скорость должна быть наибольшей, так как только в этом случае будут отсутствовать предпосылки залипания стойки рабочих органов. Для рассматриваемых случаев уже

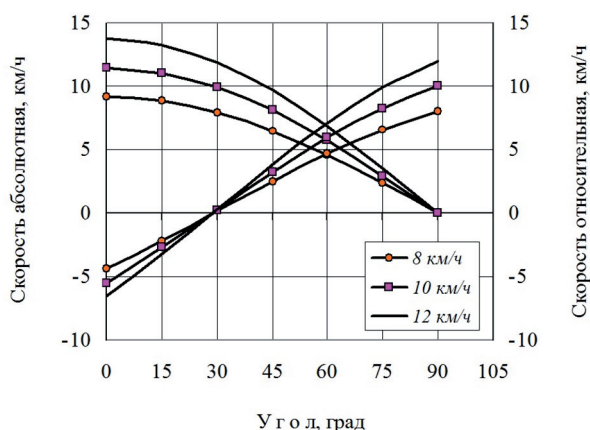


Рис. 4. Изменение абсолютной и относительной скоростей движения почвы

при угле $\beta = 30^\circ$ относительная скорость равна нулю, т.е. частицы почвы не проскальзывают по поверхности стойки, налипают на стойку и трение пары сталь – почва переходит в трение пары почва – почва.

Это приводит к увеличению тягового сопротивления орудия, так как коэффициент трения почвы по почве значительно превышает коэффициент трения почвы по стали (табл. 1).

Как видно из табл. 1, коэффициент трения почвы по почве во всех рассмотренных случаях превышает коэффициент трения почвы по стали на 42...50 %.

Уплотненное ядро почвы перед стойкой не образуется при угле заточки не более 50° . Во всех остальных случаях такое ядро образуется даже при несимметричных углах заточки. Следовательно, необходимым условием формы поперечного сечения стойки должно быть соблюдение величины указанного угла.

Из рис. 1, а видно, что для наиболее распространенных в производстве стоек (в поперечном сечении стойки – прямоугольник) частицы почвы имеют одинаковую скорость с лобовой гранью стойки. В этом случае возникают наиболее благоприятные условия для образования уплотненного ядра. Высота h этого ядра достигает величины, равной $h = \frac{2}{3}s$ (s – толщина

стойки) [7]. Следовательно, значительно увеличивается периметр, на котором существует режим трения почвы по почве. В свою очередь, длина этого периметра во многом определяет тяговое сопротивление стойки [8].

Если в поперечном сечении стойки – ромб, то, как это видно из рис. 1, б, абсолютная скорость почвы постоянна в каждой точке рассматриваемого пути взаимодействия стойки с почвой, так как углы ϕ и β на этом пути не изменяются (рис. 2). В общем случае эта скорость зависит от угла наклона грани ромба (угол заточки) к направлению движения и чем он больше, тем больше абсолютная скорость отбрасываемой почвы и тем более благоприятнее условия для образования уплотненного ядра и, следовательно, более энергоемким становится процесс взаимодействия стойки рабочего органа с почвой.

Если сечение стойки представляет собой плоскость, ограниченную вогнутой линией (рис. 1, в), то абсолютная скорость частицы почвы увеличивается и достигает максимального значения при $x = 0$, так как изменяется угол β между нормалью к поверхности скольжения и переносной скоростью. В начале взаимодействия стойки рабочего органа с почвой он максимальный, в конце минимальный. В соответствии с этим относительная скорость снижается, т.е. почва перестает скользить по поверхности стойки, и создаются условия для образования ядра уплотнения. Энергоемкость процесса увеличивается за счет увеличения коэффициента трения и затрат энергии на отбрасывание почвы. Абсолютная и относительная скорости движения почвы в этом случае являются функциями координат точки.

Наиболее рациональной является поперечное сечение стойки в виде плоскости, ограниченной выпуклой кривой (рис. 1, г), так как угол 90° между вектором переносной скорости и нормалью к траектории движения почвы по поверхности стойки увеличивается и в зоне схода со стойки достигает величины 90° . Если поперечное сечение стойки имеет форму эллипса

Таблица 1

Изменение коэффициента трения

Тип почвы	Коэффициент трения	
	почва – почва	почва – сталь
Пески, супески	0,65...0,70	0,45...0,50
Суглинки	0,75...0,85	0,50...0,60
Глины и тяжелые глины	0,90...1,00	0,60...0,70

[9, 10], тогда в соответствии с формулами (1) и (2) абсолютная скорость почвы уменьшается и при $\beta = \pi/2$ становится равной нулю, а относительная скорость увеличивается и при указанной величине угла достигает своего максимального значения, равного $V_o = V_n \sin \pi/2 = V_n$. Таким образом, затраты энергии на отбрасывание почвы стойкой снижаются, а поскольку увеличивается относительная скорость движения почвы, то отсутствуют условия для образования уплотненного ядра, следовательно, общая энергоемкость процесса обработки почвы уменьшается.

Однако в вершине эллипса (рис. 1, з) существуют предпосылки для образования ядра уплотнения, так как в этой зоне скорость скольжения почвы (относительная скорость) имеет небольшую величину, особенно если параметры (оси) эллипса различаются между собой незначительно.

На основе проведенного анализа различных форм поперечного сечения стойки рабочего органа можно заключить, что оптимальной формой этого сечения является плоскость, ограниченная кривой эллипса, одна из вершин которого должна оканчиваться острым углом величиной не более 50° .

Лучше всего указанным требованиям по форме отвечает кривая (декартов лист), которая задается параметрическими уравнениями (3) и приведена на рис. 5.

$$x = \frac{3at}{1+t^3}; y = \frac{3at^2}{1+t^3}, \quad (3)$$

где $t = \operatorname{tg}\varphi$ – параметр кривой; a – постоянный коэффициент ($OA = \frac{3a}{\sqrt{2}}$).

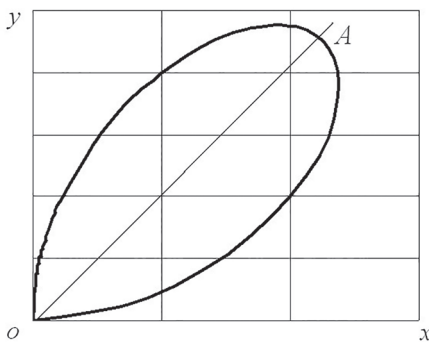


Рис. 5. Форма сечения стойки рабочих органов

Для того чтобы определить угол при вершине кривой, необходимо провести касательные к обрис частям этой кривой в точке O , т.е. определить производные в указанной точке.

Известно [11], что производная функции, заданной параметрически, определяется по формуле:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\frac{dy}{dt}}{\frac{dx}{dt}}, \quad (4)$$

где $\frac{dx}{dt} = \frac{6a\left(\frac{1}{2}-t^3\right)}{(1+t^3)^2}$; $\frac{dy}{dt} = \frac{3at(2-t^3)}{(1+t^3)^2}$.

Тогда $\frac{dy}{dx} = \frac{t(2-t^3)}{2\left(\frac{1}{2}-t^3\right)}$.

В результате $\frac{dy}{dx} = 0$ при $t = 0$ ($x = 0, y = 0$) и $\frac{dy}{dx} = \infty$ при $t = \infty$ ($x = 0, y = 0$).

Следовательно, начало координат кривая пересекает дважды – с касательной, параллельной оси Ox , и касательной, параллельной оси Oy . Но угол между этими осями равен 90° , что не удовлетворяет указанным выше требованиям по залипанию стойки почвой, при котором значительно возрастает тяговое сопротивление. Этот угол не должен превышать величины 50° .

Таким образом, форма сечения стойки кривой должна представлять собой выпуклую линию, переходящую в прямую, например дуга эллипса, которая при одной из вершин переходит в прямую по касательной к некоторой точке дуги эллипса.

Параметрические уравнения эллипса определяются формулами:

$$x = a \cos t; y = b \sin t,$$

где a и b – соответственно, большая и малая полуоси эллипса.

Тогда в соответствии с выражением (4):

$$\frac{dy}{dx} = \frac{b \cos t}{-a \sin t} = -\frac{b}{a} \operatorname{ctg} t = -2,142.$$

Так как $\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} t = \operatorname{tg} 25^\circ = 0,47 = -2,142 \frac{b}{a}$, то $\frac{b}{a} = 0,23$. Т.е. задаваясь величиной одной полуоси, можно определить вторую или определить параметры сечения стойки.

Координаты точки касания устанавливаются из параметрических уравнений при условии, что $t = 50/2 = 25^\circ$ (для верхней половины кривой эллипса):

$$\begin{aligned} x_1 &= a \cos 25^\circ = 0,906a; \\ y_1 &= b \sin 25^\circ = 0,423b. \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнение касательной $y - y_1 = \frac{dy}{dx}(x - x_1)$ или после преобразований с учетом (5) и полученного значения производной:

$$y = 2,364b - 2,142 \frac{b}{a}x. \quad (6)$$

Из этого уравнения можно определить значение x , при котором касательная пересекает ось абсцисс. Условием этого пересечения является $y = 0$, и тогда из (6) получим значение $x = 1,1a = 1,1 \cdot 3 = 3,3$. Следовательно, можно провести касательную к линии эллипса, удовлетворяющую поставленным условиям, которая должна проходить через точку касания (уравнения 5) и пересекать ось абсцисс при $x = 1,1a$. Длина отрезка касательной, заключенного между точкой касания (x_1, y_1) и пересечением его с осью абсцисс, определится из прямоугольного треугольника, который показан на рис. 6, по формуле

$$l = \sqrt{(x - x_1)^2 + y_1^2} = \sqrt{(1,1a - x_1)^2 + y_1^2}.$$

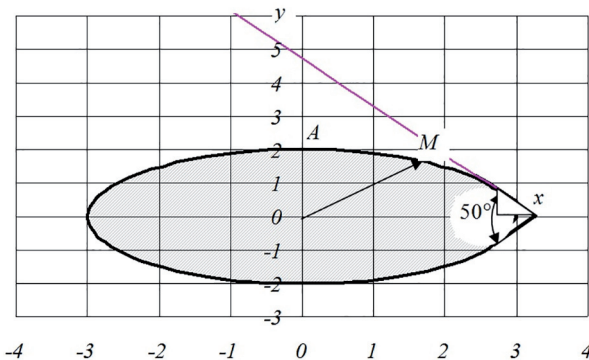


Рис. 6. Поперечное сечение стойки рабочего органа

Показанное на рис. 6 поперечное сечение стойки отвечает предъявляемым к ней требованиям, так как угол заточки не превышает 50° , что не способствует образованию ядра уплотнения, а граница имеет форму выпуклой линии, что обеспечивает получение минимального значения абсолютной скорости, а следовательно, небольшие энергетические затраты на перемещение почвы. Но, может быть, наиболее важное значение состоит в том, что незначительное

смещение почвы способствует выполнению требований агротехники по влагосбережению, распылению почвы, сохранению стерни (при работе на стерневом фоне) и др.

Так как частица почвы движется вдоль плоской кривой от точки x до точки А (рис. 6) по известной траектории, которая определяется параметрическими уравнениями эллипса $x = a \cos t, y = b \sin t$, то можно определить силу, вызывающую это движение. При этом известно, что сила зависит от положения частицы, т.е. представляет собой некоторую функцию от координат точки. Проекции указанной силы на оси координат определяются в соответствии со вторым законом Ньютона как произведение массы на ускорение: $F_x = mx''$, $F_y = my''$, а ускорение – как вторая производная от координат точки: $x'' = -a \cos t, y'' = -b \sin t$.

Тогда проекции силы будут равны:

$$\begin{aligned} F_x &= -ma \cos t; \\ F_y &= -mb \sin t. \end{aligned}$$

Так как сила зависит от положения частицы почвы на траектории, а траектория описывается параметрическими уравнениями эллипса, проекции сил на оси координат будут равны: $F_x = -mx, F_y = -my$.

Модуль силы определяется по известному выражению:

$$\begin{aligned} F &= \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{m^2 x^2 + m^2 y^2} = \\ &= m\sqrt{x^2 + y^2} = mr, \end{aligned}$$

где r – модуль радиуса-вектора материальной точки OM (см. рис. 6).

Следовательно, частица почвы движется под действием центральной силы, которая определяется траекторией движения и пропорциональна модулю радиуса-вектора [12].

Выводы

1. С точки зрения выполнения технологического процесса обработки почвы наиболее важную роль выполняют рабочие органы машины, так как именно они обеспечивают все показатели ее назначения. Остальные конструктивные элементы выполняют только вспомогательные функции. При этом анализ затрат энергии в технологических процессах сельскохозяйственного назначения показывает, что полезная часть процесса требует значительно меньших затрат, чем процесс в целом.

2. На основе проведенного анализа различных форм поперечного сечения стойки рабочего органа можно заключить, что оптимальной формой этого сечения является плоскость, ограниченная кривой эллипса, одна из вершин которого должна оканчиваться острым углом величиной не более 50 градусов, что не способствует образованию ядра уплотнения, а граница имеет форму выпуклой линии, что обеспечивает получение минимального значения абсолютной скорости, а следовательно, небольшие энергетические затраты на перемещение почвы. Но, может быть, наиболее важное значение состоит в том, что незначительное смещение почвы способствует выполнению требований агротехники по влагосбережению, распылению почвы, сохранению стерни (при работе на стерневом фоне) и др.

3. Разработанная методика позволяет определить основные параметры стойки (длину осей эллипса, уравнение касательной и ее длину, угол резания и др.), что способствует снижению энергоемкости процесса обработки почвы и повышению качества этой обработки.

4. Таким образом, каждая стойка рабочих органов почвообрабатывающих машин должна иметь форму бокового профиля, близкую к логарифмической кривой, что снижает энергоемкость процесса на 20...45 %, а в поперечном сечении стойки должна быть плоскость, ограниченная дугами эллипса и касательными к этим дугам, проведенными таким образом, чтобы угол при вершине эллипса не превышал 50°. Это уменьшает тяговое сопротивление стойки на 40...52 %.

Литература

1. Камбулов С.И. Снижение энергоемкости процесса почвообработки // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2008. № 1. С. 32–34.
2. Рыков В.Б., Камбулов С.И. Принципы основной обработки почвы и их влияние на урожайность зерновых культур // Вестник аграрной науки Дона. 2008. № 1. С. 37–42.
3. Василенко П.М., Короткевич П.С. О влиянии формы бокового профиля режущих рабочих органов и скорости движения на их тяговое сопротивление // Тракторы и сельхозмашины. 1965. № 8. С. 25–27.
4. Мачанов Р.И. Влияние формы ножа на сопротивление грунта резанию // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. 1969. № 1. С. 19–20.

5. Котов П.М., Краснощекоев Н.В. К обоснованию параметров стрельчатых рабочих органов противоэрозийных культиваторов для работы на повышенных скоростях // Повышение рабочих скоростей МТА. Научные труды. М.: Колос, 1973. С. 400–403.
6. Желиговский В.А. Элементы теории почвообрабатывающих машин и механической технологии сельскохозяйственных материалов. Тбилиси: Издательство Грузинского СХИ, 1960. 146 с.
7. Зеленин А.Н., Карасев Г.Н., Красильников Л.В. Лабораторный практикум по резанию грунтов. М.: Высшая школа, 1969. 310 с.
8. Олейко Ф.А. Выражение сопротивления врезанию при помощи интенсивности деформаций и напряжений // Труды ЦНИИМЭСХ. 1969. Том VI. Минск: Урожай. С. 59–61.
9. Божко И.В. Методика выбора схемы и параметров рабочего органа для безотвальной послонной обработки почвы в условиях недостаточного увлажнения // Омский научный вестник. 2014. № 3 (133). С. 111–114.
10. Божко И.В., Пархоменко Г.Г. Кольцевой рабочий орган для обработки почвы // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: материалы 7-й международной научно-практической конференции 25–28 февраля 2014 г. Ростов-на-Дону: Донской ГТУ, 2014. С. 78–81.
11. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления для ВТУЗов. Том 1. М.: Наука, 1965. 547 с.
12. Камбулов С.И. Механико-технологические основы повышения уровня функционирования сельскохозяйственных агрегатов. Ростов н/Д: Изд-во ООО «Терра Принт», 2006. 304 с.

References

1. Kambulov S.I. Reducing the energy intensity of the process of tillage. Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva. 2008. No 1, pp. 32–34 (in Russ.).
2. Rykov V.B., Kambulov S.I. Principles of basic soil cultivation and their influence on the yield of cereals. Vestnik agrarnoy nauki Dona. 2008. No 1, pp. 37–42 (in Russ.).
3. Vasilenko P.M., Korotkevich P.S. The effect of the shape of the lateral profile of the cutting tools and the speed of movement on their traction resistance. Traktory i sel'khoz mashiny. 1965. No 8, pp. 25–27 (in Russ.).
4. Machanov R.I. Effect of the shape of the knife on soil resistance to cutting. Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva. 1969. No 1, pp. 19–20 (in Russ.).

- fikatsiya sotsialisticheskogo sel'skogo khozyaystva. 1969. No 1, pp. 19–20 (in Russ.).
5. Kotov P.M., Krasnoshchekov N.V. The justification of the parameters of the lancet working bodies of erosion-resistant cultivators for operation at higher speeds. *Povyshenie rabochikh skorostey MTA. Nauchnye Trudy [Increase of working speeds of machine tractor units. Scientific works]*. Moscow: Kolos Publ., 1973, pp. 400–403 (in Russ.).
 6. Zheligovskiy V.A. Elementy teorii pochvoobrabatyvayushchikh mashin i mekhanicheskoy tekhnologii sel'skokhozyaystvennykh materialov [Elements of the theory of soil-cultivating machines and mechanical technology of agricultural materials]. Tbilisi: Izdatel'stvo Gruzinskogo SKhI Publ., 1960. 146 p.
 7. Zelenin A.N., Karasev G.N., Krasil'nikov L.V. *Laboratornyy praktikum po rezaniyu gruntov [Laboratory workshop on cutting soils]*. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1969. 310 p.
 8. Oleyko F.A. The expression of resistance to plunging by the intensity of deformations and stresses. Minsk: Urozhay Publ. *Trudy TsNIIMESKh*. 1969. Vol. VI, pp. 59–61 (in Russ.).
 9. Bozhko I.V. Technique of selecting the scheme and parameters of the working element for graded tillage of soil in conditions of insufficient moisture. *Omskiy nauchnyy vestnik*. 2014. No 3(133), pp. 111–114 (in Russ.).
 10. Bozhko I.V., Parkhomenko G.G. Circular working body for soil tillage. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya: Materialy 7-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 25–28 fevralya 2014 g. Rostov-na-Donu [State and prospects for the development of agricultural machinery: materials of the 7th International Scientific and Practical Conference February 25–28, 2014 Rostov-on-Don]*: Donskoy GTU Publ., 2014, pp. 78–81 (in Russ.).
 11. Piskunov N.S. *Differentsial'noe i integral'noe ischisleniya dlya VTUZov. Vol. 1 [Differential and integral calculus for technical colleges. Volume 1]*. Moscow: Nauka Publ., 1965. 547 p.
 12. Kambulov S.I. *Mekhaniko-tekhnologicheskie osnovy povysheniya urovnya funktsionirovaniya sel'skokhozyaystvennykh agregatov [Mechanic-technological basis for increasing the level of functioning of agricultural units]*. Rostov n/D: Izd-vo OOO «Terra Print» Publ., 2006. 304 p.