

**И. С. Крук<sup>1</sup>**, к. т. н., доц., **Ф. И. Назаров<sup>1</sup>**, **Ю. В. Чигарев<sup>1,2</sup>**, д. ф.-м. н., проф.,  
**Н. Г. Бакач<sup>3</sup>**, к. т. н., доц., **И. А. Тарасевич<sup>1</sup>**, **Ж. И. Пантелеева<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Республика Беларусь  
e-mail: Kruk\_Igar@mail.ru

<sup>2</sup>Западнопоморский технологический университет, г. Щецин, Республика Польша

<sup>3</sup>РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», г. Минск, Республика Беларусь

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ ПОЧВЕННОГО ПЛАСТА В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ ОБОРОТНЫМИ ПЛУГАМИ

Получены зависимости, позволяющие определить кинематические параметры движения частиц почвенно-го пласта по поверхности корпуса оборотного плуга и при падении на дно борозды.

*Ключевые слова:* траектория, движение, почва, скорость, частица, зависимость, корпус плуга, отвал.

**I. S. Kruk<sup>1</sup>**, **F. I. Nazarau<sup>1</sup>**, **U. V. Chigarau<sup>1,2</sup>**, **N. G. Bakach<sup>3</sup>**,  
**I. A. Tarasevich<sup>1</sup>**, **J. I. Panteleeva<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Educational establishment «Belarusian state agrarian technical university», Minsk, Republic of Belarus  
e-mail: Kruk\_Igar@mail.ru

<sup>2</sup> Western Pomor Technological University, Schetin, Republic of Poland

<sup>3</sup> RUE «SPC NAS of Belarus for Agriculture Mechanization», Minsk, Republic of Belarus

## DETERMINATION OF PARAMETERS OF MOVEMENT OF PARTICLES OF SOIL PLASTIC IN THE PROCESS OF PROCESSING OF CIRCULAR PLOWS

Dependences have been obtained that make it possible to determine the kinematic parameters of the motion of soil layer particles along the surface of the body of the reversible plow and fall to the bottom of the furrow.

*Keywords:* trajectory, motion, soil, speed, particle, dependence, plow body, blade.

Почвенный пласт подрезается лемехом корпуса и движется по поверхности отвала (рисунок 1) [1]. Данное движение рассматривается как относительное (система отсчета связана с отвалом). При подрезании слоя почвы величина относительной скорости принимается равной величине скорости агрегата:  $v_{п0} = v_{агр}$ . Слой почвы начинает двигаться по рабочей поверхности корпуса со скоростью  $v_{агр} \sin \alpha_{л}$  ( $\alpha_{л}$  – угол наклона кромки лемеха к направлению движения агрегата (плуга)), а движение вдоль отвала осуществляется со скоростью  $v_{агр} \cos \alpha_{л}$ . Для изучения закономерностей движения почвенного пласта по корпусу плуга примем следующие допущения: скорость агрегата со временем не меняется, поверхность отвала имеет постоянный радиус кривизны  $R_{отв}$ .

Рассмотрим движение частицы почвы массой  $m_{п}$  (кг) по поверхности отвала (линия  $AB$ ). В верхней точке  $B$  отвала (рисунок 1) на частицу действуют сила тяжести, центробежная сила инерции, сила реакции отвала и сила трения.

Сила тяжести  $G_{п} = m_{п}g$  ( $g$  – ускорение свободного падения,  $м \cdot с^{-2}$ ).

Данную силу разложим на две составляющие:  $m_{п}g \sin \gamma_{отв}$  – направленную по касательной к поверхности отвала  $\tau - \tau$ , и  $m_{п}g \cos \gamma_{отв}$  – направленную по нормали  $n - n$  к указанной поверхности ( $\gamma_{отв}$  – угол наклона касательной, проведенной к поверхности отвала в точке  $B$ , к горизонту, рад.).

Центробежная сила инерции  $F_{пц}$

$$F_{пц} = \frac{m_{п}v_{п0}^2 \sin^2 \gamma_{отв}}{R_{отв}},$$

где  $R_{отв}$  – радиус кривизны поверхности отвала в рассматриваемом сечении (радиус окружности, по которой построена парабола отвала),  $м$ .

Радиус кривизны должен обеспечивать условие полного размещения почвенного пласта на поверхности отвала, не допустив пересыпания почвы через верхний обрез, и чтобы отвальный пласт не задирался нижним обрезом.

Для плугов общего назначения принимается условие:

$$R_{\text{отв}_{\min}} \leq R_{\text{отв}} \leq R_{\text{отв}_{\max}} \quad (1)$$

Минимальный и максимальный радиусы определяются по следующим формулам:

$$R_{\min} = \frac{b_k}{\left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon_{\text{лем}}\right) \cos \gamma_{\text{лем}}};$$

$$R_{\max} = \frac{b_k \sqrt{k^2 - 1}}{k^2 (\cos \varepsilon_{\text{лем}} - \cos \theta_R)},$$

где  $b_k$  – ширина захвата корпуса,  $m$ ;  $\varepsilon_{\text{лем}}$  – угол между лемехом и дном борозды,  $\text{rad.}$ ;  $\gamma_{\text{лем}}$  – угол между лезвием лемеха и стенкой борозды,  $\text{rad.}$ ;  $k$  – количество корпусов,  $\text{шт.}$ ;  $\theta_R$  – угол ( $\text{rad.}$ ), определяемый из равенства:

$$\text{tg } \theta_R = \frac{\sqrt{k^2 - 1}}{\cos \gamma_{\text{лем}}}.$$

При невыполнении неравенства (1) минимальный радиус определяется по выражению:

$$R_{\text{отв}_{\min}} = \frac{\sqrt{k^2 - 1}}{k (\cos \varepsilon_{\text{лем}} + \sin \Delta \varepsilon_{\text{лем}})},$$

где  $\Delta \varepsilon_{\text{лем}}$  – дополнительный угол, на который увеличивается дуга окружности для обеспечения большого прогиба крыла отвала (для культурных отвалов  $\Delta \varepsilon_{\text{лем}} = 4 - 5^\circ$ , для скоростных  $\Delta \varepsilon_{\text{лем}} = 5 - 8^\circ$ , для полувинтовых  $\Delta \varepsilon_{\text{лем}} = 8 - 10^\circ$ ).

Сила реакции отвала  $N$  направлена по нормали.

Сила трения  $F_{\text{трп}}$ , направленная по касательной к поверхности отвала, определяется по формуле:

$$F_{\text{трп}} = f_{\text{трп}} N, \quad (2)$$

где  $f_{\text{трп}}$  – коэффициент трения почвы о поверхность отвала (зависит от типа и влажности почвы, шероховатости рабочих поверхностей, материала рабочих органов, удельного давления на поверхности контакта и скорости скольжения почвы) [2, 3].

Спроектировав указанные силы на нормаль  $n-n$  и касательную к поверхности отвала  $\tau-\tau$ , получим уравнения равновесия системы в следующем виде:

$$\frac{m_{\text{п}} v_{\text{п}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - m_{\text{п}} g \cos \gamma_{\text{отв}} - N = 0; \quad (3)$$

$$m_{\text{п}} a_{\text{п}} = F_{\text{трп}} + m_{\text{п}} g \sin \gamma_{\text{отв}}. \quad (4)$$

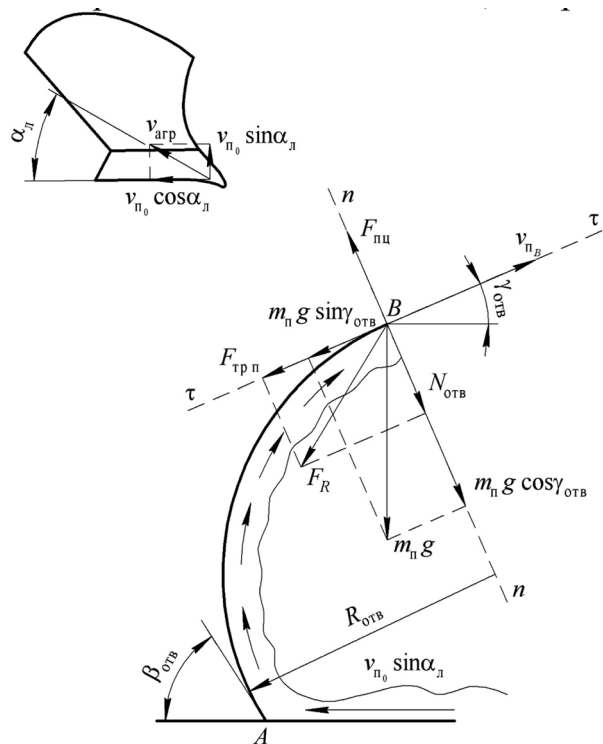


Рисунок 1. – Расчетная схема движения частицы почвы по отвалу корпуса плуга

Из равенства (3) при  $N = 0$  можно определить критическую для рассматриваемого поперечного сечения скорость движения агрегата ( $m \cdot c^{-1}$ ), при которой частица будет достигать верхней кромки отвала:

$$v_{\text{пкр}} = \sqrt{\frac{R_{\text{отв}} g \cos \gamma_{\text{отв}}}{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}}}.$$

Если скорость движения агрегата меньше критической скорости для данного сечения  $v_{\text{пкр}} > v_{\text{арп}}$ , то частица сваливается с отвала, а перед отвалом почва может сгруживаться. При условии  $v_{\text{пкр}} < v_{\text{арп}}$  обеспечивается отбрасывание слоя пласта без сгруживания.

Дальность отброса частиц почвы от оси пути зависит от величины относительной скорости движения пласта по отвалу и углов наклона вектора указанной скорости к горизонту и к направлению движения плуга. Кроме того, пласт почвы имеет переносную скорость  $v_{\text{арп}}$  вместе с движением плуга. Эта скорость определяет отброс частиц по направлению движения.

Для определения относительной скорости из уравнения (3) выразим силу  $N$  и подставим в (4). Учитывая равенство (2), получим:

$$m_{\text{п}} a_{\text{п}} = f_{\text{трп}} \frac{m_{\text{п}} v_{\text{п}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{трп}} m_{\text{п}} g \cos \gamma_{\text{отв}} + m_{\text{п}} g \sin \gamma_{\text{отв}}.$$

Разделим правую и левую части равенства на  $m_{\text{п}}$ , получим:

$$a_{\text{п}} = f_{\text{трп}} \frac{v_{\text{п}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{трп}} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}}.$$

Данное выражение можно представить в следующем виде:

$$\int \frac{v_{\text{п}} dv_{\text{п}}}{f_{\text{трп}} \frac{v_{\text{п}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{трп}} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}}} = \int dx.$$

Проинтегрировав и приняв начальные условия  $x_0 = 0$  и  $v_0 = v_{0\text{п}}$ , в конечном виде получим:

$$\begin{aligned} f_{\text{трп}} \frac{v_{\text{п}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{трп}} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}} = \\ = e^{2f_{\text{трп}} \frac{\sin^2 \gamma_{\text{отв}} x}{R_{\text{отв}}}} \cdot \left( f_{\text{трп}} \frac{v_{0\text{п}}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}}}{R_{\text{отв}}} - f_{\text{трп}} g \cos \gamma_{\text{отв}} + g \sin \gamma_{\text{отв}} \right). \end{aligned}$$

$$v_{\text{п}}^2 = e^{2f_{\text{трп}} \frac{\sin^2 \gamma_{\text{отв}} x}{R_{\text{отв}}}} \cdot \left( v_{0\text{п}}^2 - \frac{R_{\text{отв}} g \cos \gamma_{\text{отв}}}{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}} + \frac{R_{\text{отв}} g}{f_{\text{трп}} \sin \gamma_{\text{отв}}} \right) + \frac{R_{\text{отв}} g \cos \gamma_{\text{отв}}}{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}} - \frac{R_{\text{отв}} g}{f_{\text{трп}} \sin \gamma_{\text{отв}}}.$$

При  $x = l$

$$v_B = v_{\text{кон}} = \left( e^{2f_{\text{трп}} \frac{\sin^2 \gamma_{\text{отв}} l}{R_{\text{отв}}}} \cdot \left( v_{0\text{п}}^2 - \frac{R_{\text{отв}} g \cos \gamma_{\text{отв}}}{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}} + \frac{R_{\text{отв}} g}{f_{\text{трп}} \sin \gamma_{\text{отв}}} \right) + \frac{R_{\text{отв}} g \cos \gamma_{\text{отв}}}{\sin^2 \gamma_{\text{отв}}} - \frac{R_{\text{отв}} g}{f_{\text{трп}} \sin \gamma_{\text{отв}}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

Рассмотрим относительное движение частицы пласта, вылетевшей с верхней кромки отвала (рисунок 2). Для упрощения считаем, что верхняя кромка отвала параллельна нижней кромке, а частица вылетела под углом  $\gamma_{\text{отв}}$  к горизонту и под углом  $\alpha_{\text{п}}$  к направлению движения плуга. То есть плоскость полета частицы расположена в плане приблизительно под углом  $\alpha_{\text{п}}$  к продольной оси пути. Для определения наименьшего расстояния установки приставки нам необхо-

димом связать координатную ось с носком лемеха корпуса плуга и спроецировать точку падения частицы пласта на оси  $Oy$  и  $Ox$ . Расстояния, измеренные по данным осям, будут определять наименьшее расстояние между корпусом плуга и ближайшим рабочим органом катковой приставки. Для упрощения исследований на начальном этапе рассмотрим движение частицы в плоскости  $z_1Ox_1$ , ось  $O_1x_1$  которой повернута в плоскости  $xOy$  на угол  $\alpha_{\Pi}$  относительно оси  $Ox$ , соответствующий проекции угла вылета частицы на плоскость  $xOy$ .

Из анализа дифференциальных уравнений движения частицы по относительным координатным осям  $Ox_1$ ,  $Oz_1$  получаются уравнения движения частицы в параметрической форме (с независимым параметром времени  $t$ ). Поскольку траектория движения на этом участке не определена, уравнения движения будем составлять для декартовых координат (рисунок 2). Задача сводится к частному случаю исследований закономерностей движения тела, брошенного под углом к горизонту.

В начале движения частица находится в точке  $B$ , при этом:

$$t_0 = t_B = 0; \quad x_0 = x_B = 0; \quad \dot{x}_{\Pi B} = v_{\Pi B} \cos \gamma_{\text{отв}}.$$

$$z_1 = z_{\Pi B} = 0; \quad \dot{z}_{\Pi B} = v_{\Pi B} \sin \gamma_{\text{отв}}.$$

В конце движения частица почвы находится в точке  $C$ , причем

$$t_C = t; \quad z_C = h_B.$$

Запишем дифференциальные уравнения движения частицы в общем виде:

$$m_{\Pi} \ddot{x}_{\Pi B} = \sum_{k=1}^n F_{kx}; \quad m_{\Pi} \ddot{z}_{\Pi B} = \sum_{k=1}^n F_{kz}.$$

Для нашего случая

$$m_{\Pi} \ddot{x}_{\Pi B} = 0; \quad m_{\Pi} \ddot{z}_{\Pi B} = -m_{\Pi} g.$$

Откуда

$$\ddot{x}_{\Pi B} = 0; \quad \ddot{z}_{\Pi B} = -g.$$

Интегрируем методом разделения переменных:

$$\ddot{x}_{\Pi B} = \frac{dv_{\Pi Bx}}{dt}, \quad \frac{dv_{\Pi Bx}}{dt} = 0. \quad \ddot{z}_{\Pi B} = \frac{dv_{\Pi Bz}}{dt}, \quad \frac{dv_{\Pi Bz}}{dt} = -g.$$

$$\dot{x}_{\Pi B} = v_{\Pi Bx} = \frac{dv_{\Pi Bx}}{dt}, \quad (6)$$

$$\dot{x}_{\Pi z} = v_{\Pi Bz} = v_{\Pi Bz} \sin \gamma_{\text{отв}} - gt. \quad (7)$$

Выражения (6) и (7) представляют собой уравнения для проекций скорости полета частицы. Перепишем уравнения еще раз, подставив соответственно

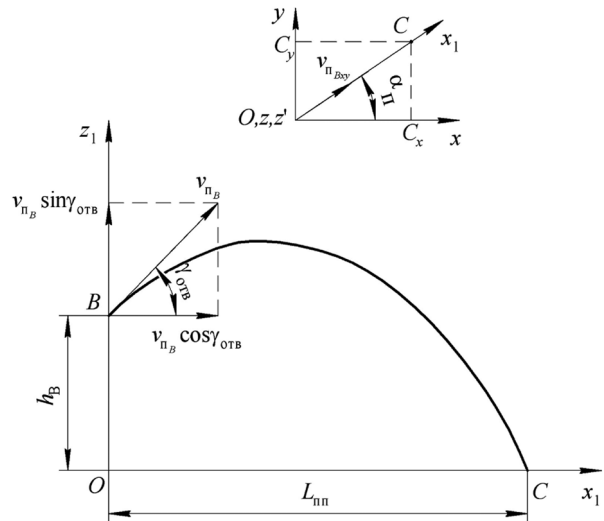


Рисунок 2. – Расчетная схема к определению расстояния падения отбрасываемой отвалом частицы почвы

$$v_{\Pi Bx} = \frac{dx}{dt}, \quad \frac{dx}{dt} = v_{\Pi B} \cos \gamma_{\text{отв}}; \quad v_{\Pi Bz} = \frac{dz}{dt}, \quad \frac{dz}{dt} = v_{\Pi Bz} \sin \gamma_{\text{отв}} - gt.$$

Проинтегрировав еще раз, получим:

$$x_{\Pi B} = v_{\Pi B} \cos \gamma_{\text{отв}} t; \quad (8)$$

$$z_{\Pi B} = v_{\Pi B} \sin \gamma_{\text{отв}} t - \frac{gt^2}{2}. \quad (9)$$

Выражения (8) и (9) являются уравнениями движения тела на участке  $BC$ . Учитывая начальные условия, получим:

$$x_{\Pi C} = v_{\Pi B} \cos \gamma_{\text{отв}} t; \quad z_{\Pi C} = v_{\Pi B} \sin \gamma_{\text{отв}} t - \frac{gt^2}{2} + h_B.$$

Исключив параметр  $t$ , получим уравнение траектории относительного движения частицы почвы:

$$z_C = x_C \operatorname{tg} \gamma_{\text{отв}} - \frac{gx_C^2}{2v_B^2 \cos^2 \gamma_{\text{отв}}} + h_B.$$

В точке падения частицы на плоскость  $z_C = 0$ . Приравняв правую часть последнего уравнения к нулю и решив получившееся квадратное уравнение, получим относительную координату в точке падения частицы почвы на плоскость  $xOy$ :

$$x_C = \frac{v_{\Pi B}}{2g} \left( v_{\Pi B} \sin^2 \gamma_{\text{отв}} + \cos \gamma_{\text{отв}} \sqrt{v_{\Pi B}^2 \sin^2 \gamma_{\text{отв}} + 2gh_B} \right).$$

Подставляя в данную зависимость равенство (5), определим расстояние, на котором частица почвы упадет на плоскость  $xOy$ . Чтобы определить расстояния между корпусом плуга и крайними рабочими органами катковой приставки, необходимо спроецировать расстояние  $Ox_C$  на координатные оси:

$$Y_{\Pi \min} = x_C \sin \alpha_{\Pi}, \quad X_{\Pi \min} = x_C \cos \alpha_{\Pi}.$$

Из полученных зависимостей следует, что расстояние падения частиц почвенного пласта определяется (по степени убывания) параметрами корпуса плуга, скоростью агрегата, типом и состоянием почвы.

## Литература

1. Горячкин, В. П. Собрание сочинений в трех томах / В. П. Горячкин. – М.: Колос, 1968. – Т. 3. – 720 с.
2. Кушнарев, А. С. Механико-технологические основы обработки почвы / А. С. Кушнарев, В. И. Кочев. – Киев: Ураджай, 1989. – 144 с.
3. Синеоков, Г. Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г. Н. Синеоков, И. М. Панов. – М.: Машиностроение, 1977. – 328 с.