

Yuri Chigarev^{1,2)}, Fedor Nazarau²⁾, Igor Kruk²⁾, Waclaw Romaniuk³⁾, Aleksander Brzostowicz¹⁾

¹⁾ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Polska

²⁾ Białoruski Państwowy Rolno-Techniczny Uniwersytet, Mińsk, Białoruś

³⁾ Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Oddział Warszawa, Zakład Systemów Infrastruktury Technicznej Wsi, Polska

BADANIA KINEMATYCZNE PRZEMIESZCZANIA WARSTWY GLEBY PO POWIERZCHNI KORPUSU PŁUGA W CELU USTALENIA PARAMETRÓW INSTALOWANIA DODATKOWYCH NARZĘDZI W AGREGATACH UPRAWOWYCH

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЧВЕННОГО ПЛАСТА ПО ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСА ПЛУГА ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ ОРУДИЙ В ПАХОТНЫХ АГРЕГАТАХ

Аннотация

В статье получено уравнение движения пласта по отвалу в зависимости от скорости агрегата, угла, характеризующего кривизну траектории, силы тяжести пласта, силы тяги, силы сопротивления, обусловленной перекомпоновкой частиц почвенного пласта при его подъеме по отвалу. Получены аналитические выражения для определения времени движения пласта по отвалу, определения координат падения пласта на поверхность поля и оценки времени падения.

Ключевые слова: почвенный пласт, частица, движение, сила, движение, плуг, траектория, зависимость

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность дополнительной поверхностной обработки почвенного пласта одновременно со вспашкой определяется конструкцией пахотного агрегата. Технологический процесс совмещения вспашки и поверхностной обработки почвенных пластов осуществляется следующим образом. Почвенный пласт подрезается и начинает подъем по лемеху, далее происходит скольжение по поверхности отвала, поворот и частичное крошение. Пласт почвы отбрасывается с поверхности отвала под углом к горизонтальной и вертикальным плоскостям и падает на поверхность поля на некотором расстоянии от корпуса плуга. Наименьшее расстояние установки дополнительных устройств определяется условием полного оседания частиц почвы, которым была передана энергия движения корпуса плуга до начала воздействия на почву рабочих органов дополнительных орудий (рисунок 1). То есть в момент соприкосновения рабочего органа дополнительного устройства почвенный пласт должен быть неподвижен.

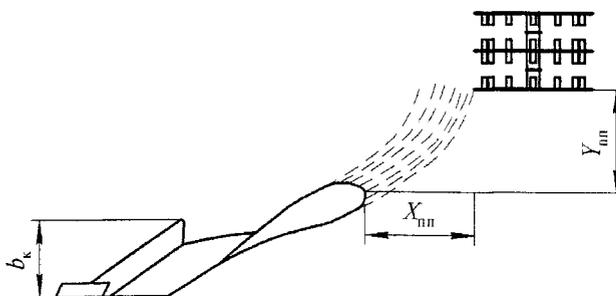


Рис. 1. Схема установки дополнительных почвообрабатывающих устройств относительно корпуса плуга

Как показывают эксперименты нерациональная установка почвообрабатывающих устройств относительно корпуса плуга влияет на энергоемкость, материалоемкость и качество выполнения технологического процесса.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Дальность отбрасывания частиц почвенного пласта отвалом определяется скоростью движения агрегата, типом и параметрами отвала, размерами и состоянием пласта [1]. Обычно для изучения закономерностей оборачивания и отбрасывания почвенного пласта корпусом плуга

применяются следующие допущения: пласт принимается за материальную точку, скорость агрегата со временем не меняется, поверхность отвала имеет постоянный радиус кривизны [2]. Почвенный пласт подрезается лемехом корпуса и движется по поверхности отвала (рисунок 1). Данное движение рассматривается как относительное, подвижная система отсчета связана с отвалом. При подрезании слоя почвы начальная величина относительной скорости принимается равной величине скорости агрегата. Отметим, что отвал имеет довольно сложную конфигурацию, поэтому определять его поверхность как окружность, можно с большим приближением. В нашем случае кривизна отвала описывается не радиусом окружности, а уравнениями циклоиды, которую образуют точки окружности радиуса r (рисунок 2).

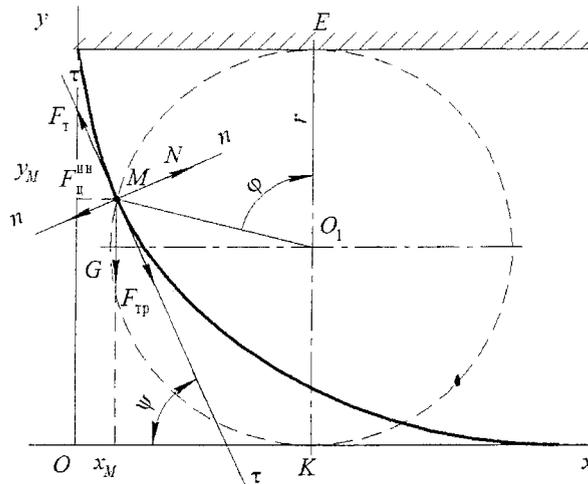


Рис. 2. Кинематика движения почвенного пласта

Рассмотрим частицу почвы массы m на поверхности отвала. Свяжем с точкой подвижную систему координат (τ, n) . Ось $\tau - \tau$ – касательная к циклоиде, $n - n$ – нормаль. Точка движется вдоль касательной к траектории движения, которая в каждый момент времени меняет направление. Запишем уравнение движения относительно оси $\tau - \tau$. На точку будут действовать сила тяжести $G = mg$ (g – ускорение свободного падения, м/с^2), сила внутреннего трения частиц пласта почвы $F_{\text{тр}} = \mu s$ (μ – коэффициент сопротивления (вязкости), $\text{Н}\cdot\text{с/м}$), $s = \overset{\circ}{BM}$ – путь, пройденный точкой M за время t , м), сила тяги F_{τ} и центробежная сила инерции $\overset{\circ}{F}_n^{\text{ин}} = -m\overset{\circ}{a}_n$ (a_n – нормальное ускорение). Здесь и далее точками над буквами обозначаем производную по времени t , а штрихами – производную по x . Сила сопротивления обусловлена внутренним трением движения частиц пласта почвы (крошение, перемешивание, переупаковка порового пространства).

Имеем:

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} = -mg \sin \psi - F_{\text{тр}} + F_{\tau}, \quad (1)$$

где ψ – угол наклона касательной, проведенной к циклоиде в точке M , к горизонту.

Учитывая, что $F_{\text{тр}} = \mu s$, уравнение (1) можно записать в следующем виде

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} = -mg \sin \psi - \mu \frac{ds}{dt} + F_{\tau}, \quad (2)$$

где $s = \overset{\circ}{BM}$ – путь пройденный точкой M за время t .

Данное уравнение содержит три переменные s, t, ψ . Предположим, что поверхность отвала может быть описана уравнением «перевернутой» циклоиды, где r – радиус катящегося по горизонтальной линии (потолку) круга (рисунок 2)

$$\left. \begin{aligned} x &= r(\varphi + \sin \varphi), \\ y &= r(1 + \cos \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где φ – угол между прямой, проведенной из центра круга O_1 , перпендикулярно потолку и отрезком, соединяющим точку M и центр круга O_1 .

Из (3) составим выражение для производной

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{r \sin \varphi}{r(1 - \cos \varphi)} = -\frac{2 \sin \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\varphi}{2}}{2 \sin^2 \frac{\varphi}{2}} = -\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}. \quad (4)$$

В тоже время дифференциал дуги циклоиды есть выражение

$$ds = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx. \quad (5)$$

Подставив (4) в (5) дифференциал дуги циклоиды будет

$$ds = \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \frac{\varphi}{2}} dx. \quad (6)$$

Из первого уравнения (3) найдем

$$dx = r(1 - \cos \varphi) d\varphi = 2r \sin^2 \frac{\varphi}{2}. \quad (7)$$

Тогда дифференциал пути (6) будет

$$ds = \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \frac{\varphi}{2}} 2r \sin^2 \frac{\varphi}{2} d\varphi = 2r \sin \frac{\varphi}{2} d\varphi. \quad (8)$$

После интегрирования (8) путь проходимого точкой почвы по плугу будет

$$s = \int_0^{\varphi} 2r \sin \frac{\varphi}{2} d\varphi = 4r \cos \frac{\varphi}{2} \Big|_0^{\varphi} = 4r(1 - \cos \frac{\varphi}{2}). \quad (9)$$

Отсюда

$$\cos \frac{\varphi}{2} = 1 - \frac{s}{4r}. \quad (10)$$

Согласно рисунку 1 можно записать

$$\frac{dy}{dx} = -\operatorname{tg} \psi.$$

То учитывая (4) путем простых преобразований получим

$$\sin \psi = \operatorname{tg} \psi \cos \psi = \frac{\operatorname{tg} \psi}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}} = \frac{-\frac{dy}{dx}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} = \frac{\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \frac{\varphi}{2}}} = \cos \frac{\varphi}{2}. \quad (11)$$

Сравнивая (10) и (11) получим

$$\sin \psi = 1 - \frac{s}{4r}. \quad (12)$$

Уравнение движения (2) частицы почвы по поверхности плуга с учетом (12) запишется в виде

$$ms = -mg\left(1 - \frac{s}{4r}\right) - \mu s + F_T.$$

где $s = \frac{ds}{dt}$; $s = \frac{d^2s}{dt^2}$.

Уравнение преобразуем к виду

$$ms = -mg + \frac{mgs}{4r} - \mu s + F_T.$$

или

$$s = -g + \frac{gs}{4r} - \frac{\mu}{m}s + \frac{F_T}{m}. \quad (13)$$

Введем обозначение

$$A = \frac{\mu}{m}; B = \frac{g}{4r}; D = \frac{F_T}{m}. \quad (14)$$

Тогда (13) с учетом (14) приводит к уравнению

$$s + As - Bs = \Phi, \quad (15)$$

где $\Phi = D - g$.

Решение (15) запишем в виде суммы

$$s = s_1 + s_2,$$

где s_1 – общий интеграл однофакторного уравнение;

s_2 – частный интеграл многофакторного уравнения.

Решение однородного уравнения

$$s + As - Bs = 0 \quad (16)$$

ищем в виде $s_1 = e^{\lambda t}$

Характеристическое уравнение

$$\lambda^2 + A\lambda - B = 0$$

Имеет корни

$$\lambda_{1,2} = \frac{-A \pm \sqrt{A^2 + 4B}}{2}. \quad (17)$$

Поэтому решение (16) имеет вид

$$s_1 = c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t}. \quad (18)$$

Частное решение запишем в виде

$$s_2 = E (E = const). \quad (19)$$

Так как

$$s_2 = 0, s_2 = 0,$$

то из (15) получим

$$s_2 = E = -\frac{\Phi}{B} = 4r\left(1 - \frac{D}{g}\right). \quad (20)$$

Учитывая (18) и (20) решение уравнения (15) будет

$$s = c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t} + E. \quad (21)$$

В начальный момент времени $t_0 = 0$, $s_0 = 0$, $s_0 = v_{\text{пл}}$.

Продифференцируем (21) по t

$$s = c_1 \lambda_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{\lambda_2 t}. \quad (22)$$

Подставив начальные условия в (21) и (22) получим систему уравнений

$$\begin{cases} c_1 + c_2 = -E, \\ \lambda_1 c_1 + \lambda_2 c_2 = v_{\text{пл}}. \end{cases} \quad (23)$$

Данная система имеет решение, так как

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 \end{vmatrix} = -\sqrt{A^2 + 4B} \neq 0.$$

Решая (23) найдем

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} -E & 1 \\ v_{\text{пл}} & \lambda_2 \end{vmatrix} = -E\lambda_2 - v_{\text{пл}} = -(E\lambda_2 + v_{\text{пл}}),$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & -E \\ \lambda_2 & v_{\text{пл}} \end{vmatrix} = v_{\text{пл}} + E\lambda_1.$$

Следовательно

$$c_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{E\lambda_2 + v_{\text{пл}}}{\sqrt{A^2 + 4B}},$$

$$c_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{v_{\text{пл}} + E\lambda_1}{-\sqrt{A^2 + 4B}}.$$

Подставим c_1 и c_2 в (21) получим уравнение движения пласта почвы по поверхности плуга

$$s = \frac{E\lambda_2 + v_{\text{пл}}}{\sqrt{A^2 + 4B}} e^{\lambda_1 t} - \frac{v_{\text{пл}} + E\lambda_1}{\sqrt{A^2 + 4B}} e^{\lambda_2 t} + E. \quad (24)$$

Взяв производную по времени (24) получим скорость движения пласта

$$s = \frac{(E\lambda_2 + v_{\text{пл}})\lambda_1}{\sqrt{A^2 + 4B}} e^{\lambda_1 t} - \frac{(v_{\text{пл}} + E\lambda_1)\lambda_2}{\sqrt{A^2 + 4B}} e^{\lambda_2 t}. \quad (25)$$

Преобразуем (24) и (25) к виду

$$s = \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} [E\lambda_2 e^{\lambda_1 t} + v_{\text{пл}} e^{\lambda_1 t} - v_{\text{пл}} e^{\lambda_2 t} - E\lambda_1 e^{\lambda_2 t}] + E =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} [E(\lambda_2 e^{\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{\lambda_2 t}) + v_{\text{пл}}(e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t})] + E, \quad (26)$$

$$s = \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} [E\lambda_2 \lambda_1 e^{\lambda_1 t} + v_{\text{пл}} \lambda_1 e^{\lambda_1 t} - v_{\text{пл}} \lambda_2 e^{\lambda_2 t} - E\lambda_1 \lambda_2 e^{\lambda_2 t}] =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} [E\lambda_1 \lambda_2 (e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}) + v_{\text{пл}} (\lambda_1 e^{\lambda_1 t} - \lambda_2 e^{\lambda_2 t})]. \quad (27)$$

Заметим, что

$$\lambda_1 \lambda_2 = \left(-\frac{A}{2} + \frac{\sqrt{A^2 + 4B}}{2} \right) \left(-\frac{A}{2} - \frac{\sqrt{A^2 + 4B}}{2} \right) = \left(-\frac{A}{2} \right)^2 - \left(\frac{\sqrt{A^2 + 4B}}{2} \right)^2 =$$

$$= \frac{A^2}{4} - \frac{A^2 + 4B}{4} = -B = -\frac{g}{4r}.$$

Проанализируем выражение

$$E = 4r \left(1 - \frac{D}{g} \right) = 4r \left(1 - \frac{F_T}{mg} \right),$$

$$E \lambda_1 \lambda_2 = \left(4r - \frac{4rF_T}{mg} \right) \left(-\frac{g}{4r} \right) = \frac{F_T}{m} - g.$$

Из физических соображений должно быть

$$\frac{F_T}{m} - g > 0 \Rightarrow F_T > mg.$$

Из приведенных выше рассуждений следует, что $F_T > mg$ т.е. сила тяги пласта почвы должна быть больше его силы тяжести.

Анализ (26) и (27) показывает, что s и \dot{s} будет расти, если $F_T > mg$ т.е. сила тяги частицы почвы должна быть больше ее силы тяжести в каждой точке траектории ее движения по поверхности отвала.

Полученные выше параметры движения частиц почвы были связаны с ее относительным движением относительно движущегося плуга. Далее частица пласта вылетает с верхней кромки отвала, движется в пространстве относительно неподвижной системы отсчета (рисунок 3). Начальная скорость полета частицы пласта будет равна ее конечной скорости на кромке отвала, которую можно получить из формулы (25) или (26) подставив в нее время движения частицы почвы по отвалу.

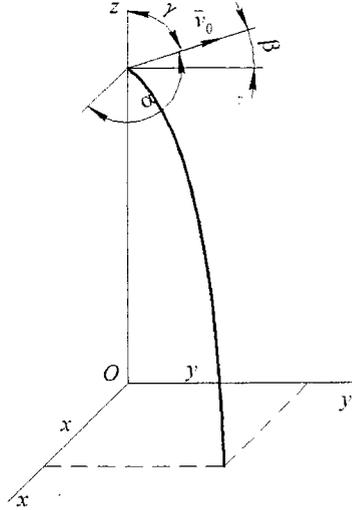


Рис. 3. Траектория движения пласта почвы

Полет пласта почвы при отсутствии сил сопротивления воздуха можно описать уравнениями движения

$$\begin{aligned} mx &= 0, \\ my &= 0, \\ mz &= -mg. \end{aligned} \tag{28}$$

После интегрирования

$$\left. \begin{aligned} x &= c_1, \\ x &= c_1 t + c_2, \\ y &= c_3, \\ y &= c_3 t + c_4, \\ z &= -gt + c_5, \\ z &= -\frac{gt^2}{2} + c_5 t + c_6. \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

При $t = 0, z = h_0, v = v_0,$

где v_0 – скорость пласта почвы на кромке отвала, м/с;

h_0 – высота от поверхности почвы до кромка отвала, м.

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= v_0 \cos \alpha; x_0 = 0, \\ y_0 &= v_0 \cos \beta; y_0 = 0, \\ z_0 &= v_0 \cos \gamma; z_0 = z_0 = h_0. \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Найдем $c_i (i = 1 \dots 6)$

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= v_0 \cos \alpha, \\ c_2 &= 0, \\ c_3 &= v_0 \cos \beta, \\ c_4 &= 0, \\ c_5 &= v_0 \cos \gamma, \\ c_6 &= h_0. \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Подставим значение (31) в (29).

Получим уравнения движения

$$\left\{ \begin{aligned} x &= v_0 t \cos \alpha, \\ y &= v_0 t \cos \beta, \\ z &= -\frac{gt^2}{2} + v_0 t \cos \gamma + h_0. \end{aligned} \right. \quad (32)$$

Из первых 2-х уравнений (32) получим

$$x + y = v_0 t (\cos \alpha + \cos \beta),$$

откуда

$$t = \frac{x + y}{v_0 (\cos \alpha + \cos \beta)}. \quad (33)$$

Подставим (33) в третье уравнение (3) получим уравнение траектории

$$z = -\frac{g(x + y)^2}{2v_0^2 (\cos \alpha + \cos \beta)^2} + \frac{\cos \gamma (x + y)}{\cos \alpha + \cos \beta} + h_0 \quad (34)$$

Определим время падения пласта почвы из третьего уравнения (32), принимая $z = 0$

$$0 = -\frac{gt^2}{2} + v_0 t \cos \gamma + h_0,$$

$$gt^2 - 2v_0t \cos \gamma - 2h_0 = 0,$$

$$t_{1,2} = \frac{2v_0 \cos \gamma \pm \sqrt{4v_0^2 \cos^2 \gamma + 8gh_0}}{2g}. \quad (35)$$

Время падения будет соответствовать положительному значению выражения (35). Как видно из формулы (35) время падения частицы почвы на поле зависит от скорости на кромке отвала, высоты корпуса плуга и угла между осью oz и вектором скорости на кромке отвала. При $\gamma = \pi/2$ имеем минимальное время падения т.е.

$$t = \frac{\sqrt{2gh_0}}{g}. \quad (36)$$

Изменение времени падения по зависимостям (35) (при $v_0 = 2,7$ м/с) и (36) представлены на рисунке 4.

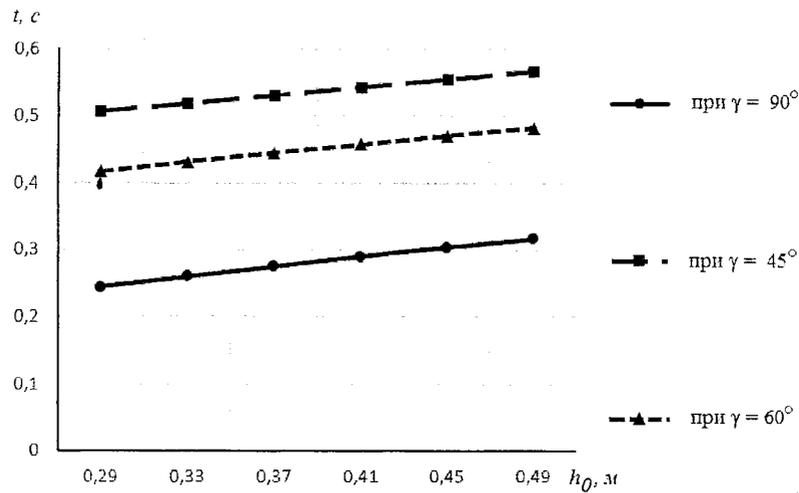


Рис. 4. Зависимости времени полета частицы t от угла γ и высоты h_0

Полагая, что поступательное движение плуга осуществляется вдоль оси y определим координату (x ; y) место падения пласта почвы на поле. Учитывая (36) из первых двух уравнений (32) получим

$$\begin{cases} x = \frac{v_0 \sqrt{2gh_0}}{g} \cos \alpha, \\ y = \frac{v_0 \sqrt{2gh_0}}{g} \cos \beta. \end{cases} \quad (37)$$

Отметим, что углы α , β , γ задаются конструктивными параметрами плуга (кромки отвала).

В формулах (26) и (27) разложим $e^{\lambda_i t}$ ($i = 1, 2$) в ряд Тейлора, ограничиваясь линейными членами. Тогда (26) можно записать в виде

$$s = \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} [E[\lambda_2(1 + \lambda_1 t) - \lambda_1(1 + \lambda_2 t)] + v_{\text{пл}}(1 + \lambda_1 t - 1 - \lambda_2 t)] =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} [E(\lambda_2 - \lambda_1) + v_{\text{пл}}] + \frac{t}{\sqrt{A^2 + 4B}} [v_{\text{пл}}(\lambda_1 - \lambda_2)]. \quad (38)$$

Откуда найдем время движения пласта почвы по отвалу корпуса плуга

$$\frac{t}{\sqrt{A^2 + 4B}} [v_{\text{пл}}(\lambda_1 - \lambda_2)] = s - \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} [E(\lambda_2 - \lambda_1) + v_{\text{пл}}].$$

т.е.

$$t = \frac{s\sqrt{A^2 + 4B}}{v_{\text{пл}}(\lambda_1 - \lambda_2)} - \frac{E(\lambda_2 - \lambda_1) + v_{\text{пл}}}{v_{\text{пл}}(\lambda_1 - \lambda_2)}. \quad (39)$$

Зная время движения пласта по отвалу (39) по формуле (27) можно определить его скорость вдоль траектории s в том числе и скорость v_0 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была сделана попытка исследовать движение пласта почвы по отвалу корпуса плуга, когда его траектория описывается «перевернутой» циклоидой.

Получено уравнение движения пласта по отвалу в зависимости от скорости агрегата, угла, характеризующего кривизну траектории, силы тяжести пласта, силы тяги, силы сопротивления, обусловленной перекомпоновкой частиц почвенного пласта при его подъеме по отвалу.

Получены аналитические выражения для определения времени движения пласта по отвалу, определения координат падения пласта на поверхность поля и оценки времени падения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горячкин В.П. Собрание сочинений.
2. Обоснование параметров установки катковых приставок относительно корпусов плуга / Крук И.С. [и др]. Материалы междунар. научн.-практ. конф. «Передовые технологии и техническое обеспечение сельскохозяйственного производства» 30–31 марта 2017, БГАТУ, Минск.

BADANIA KINEMATYCZNE PRZEMIESZCZANIA WARSTWY GLEBY PO POWIERZCHNI KORPUSU PŁUGA W CELU USTALENIA PARAMETRÓW INSTALOWANIA DODATKOWYCH NARZĘDZI W AGREGATACH UPRAWOWYCH

Yuri Chigarev, Fedor Nazarau, Igor Kruk, Waclaw Romaniuk, Aleksander Brzóstowicz

Streszczenie

W pracy opracowano równanie matematyczne ruchu warstwy gleby, w zależności od szybkości agregacji, kąta charakteryzującego krzywiznę toru, ciężaru warstwy, siły ucięcia, siły oporu wynikającej z przegrupowania cząstek warstwy gruntu.

Słowa kluczowe: warstwa gleby, cząstki, ruch, siła, pług, zależność

KINEMATIC MOTION STUDIES OF SOIL LAYER ON THE SURFACE OF THE BODY OF THE PLOW TO JUSTIFY THE INSTALLATION OPTIONS ADDITIONAL TILLING TOOLS IN THE ARABLE UNITS

Yuri Chigarev, Fedor Nazarau, Igor Kruk, Waclaw Romaniuk, Aleksander Brzóstowicz

Abstract

In this article we obtain the equation of motion of a formation on the blade depending on the speed of the unit, the angle characterizing the curvature of the trajectory, the gravity of the reservoir, the thrust, the resistance force caused by the rearrangement of the particles of soil layer when lifting the blade. The analytical expressions for determining the time of movement of a formation on the blade, determine the coordinates of dip the soil surface and estimating the time of a fall.

Key words: soil formation, particle movement, force, motion, plow, path, dependency