

УДК 631.363

Обоснование параметров установки дополнительных почвообрабатывающих орудий в пахотных агрегатах с учетом движения почвенного пласта по поверхностям корпуса плуга

Чигарев Юрий Власович, доктор физико-математических наук, профессор
e-mail: peter.savinyh@mail.ru

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Республика Беларусь
Западнопоморский технологический университет, Щецин, Республика Польша

Савиных Петр Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией
e-mail: peter.savinyh@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого»

Назаров Федор Игоревич, ассистент кафедры
e-mail: peter.savinyh@mail.ru

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Республика Беларусь

Крук Игорь Степанович, кандидат технических наук, доцент, декан факультета механизации

e-mail: Kruk_Igar@mail.ru

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Республика Беларусь

Романюк Вацлав, доктор технических наук, профессор
e-mail: peter.savinyh@mail.ru

Институт технологических и естественных наук в Фалентах, отдел в Варшаве, Республика Польша

Аннотация. В статье получено уравнение движения пласта по отвалу в зависимости от скорости агрегата, характеризующего кривизну траектории угла, силы тяжести пласта, прилагаемой силы тяги и силы сопротивления, обусловленной переупаковкой 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. Полученные результаты могут быть использованы в области сельскохозяйственного машиностроения при проектировании оборотных плугов и дополнительных орудий, предназначенных для поверхностной обработки почвенных пластов к ним.

Ключевые слова: плуг, орудие, обработка, почвенный пласт, частица, сила, скорость, движение, плуг, траектория, зависимость.

Экономическая и технологическая 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 (рис. 1). То есть в момент соприкосновения рабочего органа дополнительного устройства почвенный пласт должен быть неподвижен.

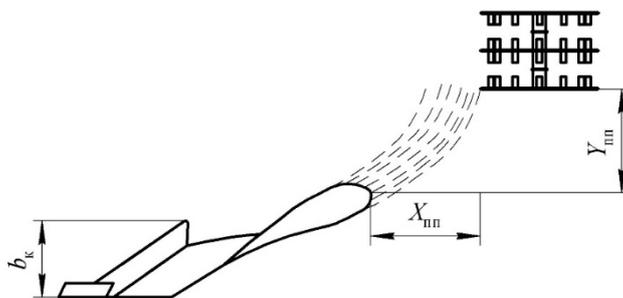


Рисунок 1. Схема установки дополнительных почвообрабатывающих устройств относительно корпуса плуга

Как показывает практика, нерациональная установка почвообрабатывающих устройств относительно корпуса плуга влияет на энергоёмкость, материалоемкость и качество выполнения технологического процесса.

Результаты и их обсуждение

Дальность отбрасывания частиц почвенного пласта отвалом определяется скоростью движения агрегата, типом и параметрами отвала, размерами и состоянием пласта [1–10]. 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 [10–14]. Почвенный пласт подрезается лемехом корпуса и движется по поверхности отвала. Данное движе-

ние 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_c (рис. 2).

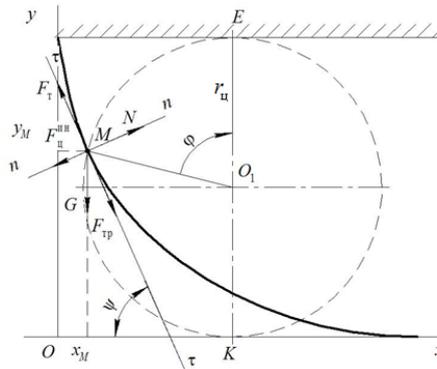


Рисунок 2. Кинематика движения почвенного пласта

Рассмотрим движение пласта массой m_{II} 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 $G = m_{II}g$ (g ускорение свободного падения, m/c^2), сила внутреннего трения частиц пласта почвы $F_{тр} = \mu \dot{s}$ (μ коэффициент сопротивления (вязкости), $N \cdot c/m$; \dot{s} - скорость почвенного пласта, m/c), $s = \check{B}M$ путь, пройденный точкой М за время t_1 , м), сила тяги F_T и центробежная сила инерции $F_{ц} = -m_{II} \bar{a}_n$ (a_n нормальное ускорение), сила реакции поверхности отвала N . Здесь и далее точками над буквами обозначаем производную по времени t_1 . Сила сопротивления обусловлена внутренним трением движения частиц пласта почвы (крошение, перемешивание, переупаковка порового пространства) [10–15].

Имеем:

$$m_{II} \frac{d^2s}{dt_1^2} = -m_{II}g \sin \psi - F_{тр} + F_T, \tag{1}$$

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

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

$$m_{II} \frac{d^2s}{dt_1^2} = -m_{II}g \sin \psi - \mu \frac{ds}{dt_1} + F_T, \tag{2}$$

где $s = \check{B}M$ путь пройденный точкой М за время t_1 .

Данное уравнение содержит три переменные s , t_1 , ψ . Предположим, что поверхность отвала может быть описана уравнением «перевернутой» циклоиды, где $r_{ц}$ – радиус катящегося по горизонтальной линии (потолку) круга (см. рис. 2):

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

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

Из уравнений (3) составим выражение для производной:

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

В тоже время дифференциал дуги циклоиды есть выражение:

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

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

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

Из первого уравнения (3) найдем:

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

Тогда дифференциал пути (6) будет равен:

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

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

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

Отсюда:

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

Согласно рисунку 2 можно записать:

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

Учитывая равенство (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 равенства (10) и (11) получим:

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

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

$$m_{\text{п}}\ddot{s} = -m_{\text{п}}g \left(1 - \frac{s}{4r_{\text{ц}}}\right) - \mu\dot{s} + F_{\text{т}}$$

где $\dot{s} = \frac{ds}{dt_1}$, $\ddot{s} = \frac{d^2s}{dt_1^2}$.

Уравнение преобразуем к виду:

$$m_{\text{п}}\ddot{s} = -m_{\text{п}}g + \frac{m_{\text{п}}gs}{4r_{\text{ц}}} - \mu\dot{s} + F_{\text{т}}$$

или

$$\ddot{s} = -g + \frac{gs}{4r_{\text{ц}}} - \frac{\mu}{m_{\text{п}}}\dot{s} + \frac{F_{\text{т}}}{m_{\text{п}}} \quad (13)$$

Введем обозначение:

$$A = \frac{\mu}{m_{\text{п}}}; \quad B = \frac{g}{4r_{\text{ц}}}; \quad D = \frac{F_{\text{т}}}{m_{\text{п}}} \quad (14)$$

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

$$\ddot{s} + A\dot{s} - Bs = \Phi, \quad (15)$$

где $\Phi = D - g$.

Решение уравнения (15) запишем в виде суммы:

$$s = s_1 + s_2,$$

где s_1 – общий интеграл уравнение,

s_2 – частный интеграл уравнения.

Решение однородного уравнения

$$\ddot{s} + A\dot{s} - Bs = 0 \quad (16)$$

ищем в виде $s_1 = e^{\lambda t_1}$.

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:

$$s_1 = c_1 e^{\lambda_1 t_1} + c_2 e^{\lambda_2 t_1}, \quad (18)$$

где t_1 – время движения почвы по корпусу плуга, с.

Частное решение запишем в виде:

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

Так как $\dot{s} = 0$, $\ddot{s} = 0$ то из уравнения (15) получим:

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

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

$$s = c_1 e^{\lambda_1 t_1} + c_2 e^{\lambda_2 t_1} + E. \quad (21)$$

В начальный момент времени $t_0 = 0$, $s_0 = 0$, $s_0 = v_{\text{агр}} \cos \psi = v_{\text{по}}$ ($v_{\text{по}}$ – скорость почвенного пласта в начале лемеха), м/с.

Продифференцируем равенство (21) по t_1 , получим:

$$\dot{s} = c_1 \lambda_1 e^{\lambda_1 t_1} + c_2 \lambda_2 e^{\lambda_2 t_1} \quad (22)$$

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

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

Данная система имеет решение, так как:

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 \end{vmatrix} = -\sqrt{A^2 + 4B} \neq 0$$

Решая систему (23) найдем:

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

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

Следовательно:

$$c_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{E\lambda_2 + v_{\text{по}}}{\sqrt{A^2 + 4B}} \quad (24)$$

$$c_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{E\lambda_1 + v_{\text{по}}}{-\sqrt{A^2 + 4B}} \quad (25)$$

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

$$s = \frac{E\lambda_2 + v_{\text{по}}}{\sqrt{A^2 + 4B}} e^{\lambda_1 t_1} - \frac{E\lambda_1 + v_{\text{по}}}{\sqrt{A^2 + 4B}} e^{\lambda_2 t_1} + E \quad (26)$$

Взяв производную по времени (26) получим скорость движения пласта:

$$\dot{s} = \frac{(E\lambda_2 + v_{\text{по}})\lambda_1}{\sqrt{A^2 + 4B}} e^{\lambda_1 t_1} - \frac{(E\lambda_1 + v_{\text{по}})\lambda_2}{\sqrt{A^2 + 4B}} e^{\lambda_2 t_1} \quad (27)$$

Преобразуем равенства (26) и (27) к виду:

$$\begin{aligned} s &= \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} [E\lambda_2 e^{\lambda_1 t_1} + v_{\text{по}} e^{\lambda_1 t_1} - v_{\text{по}} e^{\lambda_2 t_1} - E\lambda_1 e^{\lambda_2 t_1}] + E = \\ &= \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} [E(\lambda_2 e^{\lambda_1 t_1} - \lambda_1 e^{\lambda_2 t_1}) + v_{\text{по}}(e^{\lambda_1 t_1} - e^{\lambda_2 t_1})] + E \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} [E\lambda_2 \lambda_1 e^{\lambda_1 t_1} + v_{\text{по}} \lambda_1 e^{\lambda_1 t_1} - v_{\text{по}} \lambda_2 e^{\lambda_2 t_1} - E\lambda_1 \lambda_2 e^{\lambda_2 t_1}] = \\ &= \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} [E\lambda_1 \lambda_2 (e^{\lambda_1 t_1} - e^{\lambda_2 t_1}) + v_{\text{по}}(\lambda_1 e^{\lambda_1 t_1} - \lambda_2 e^{\lambda_2 t_1})] \end{aligned} \quad (29)$$

Заметим, что:

$$\begin{aligned} \lambda_1 \lambda_2 &= \left(-\frac{A}{2} + \frac{\sqrt{A^2 + 4B}}{2} \right) \left(-\frac{A}{2} - \frac{\sqrt{A^2 + 4B}}{2} \right) = \left(-\frac{A}{2} \right)^2 - \left(\frac{\sqrt{A^2 + 4B}}{2} \right)^2 = \frac{A^2}{4} - \frac{A^2 + 4B}{4} \\ &= -B = -\frac{g}{4r_{\text{ц}}} \end{aligned}$$

$$E = 4r_{ц} \left(1 - \frac{D}{g} \right) = 4r_{ц} \left(1 - \frac{F_{\tau}}{m_{пг}} \right),$$

$$E\lambda_1\lambda_2 = \left(4r_{ц} - \frac{4r_{ц}F_{\tau}}{m_{пг}} \right) \left(-\frac{g}{4r_{ц}} \right) = \frac{F_{\tau}}{m_{пг}} - g.$$

Из физических соображений должно выполняться условие:

$$\frac{F_{\tau}}{m_{пг}} - g \Rightarrow F_{\tau} > m_{пг}g \quad (30)$$

Из приведенных выше рассуждений следует, что сила тяги пласта почвы должна быть больше его силы тяжести, т.е. $F_{\tau} > m_{пг}g$.

Анализ равенств (28) и (29) показывает, что s и \dot{s} будет расти, если $F_{\tau} > m_{пг}g$, т.е. сила тяги пласта почвы должна быть больше ее силы тяжести в каждой точке траектории движения по поверхности отвала.

Для определения силы тяги вдоль плуга составим уравнения равновесия относительно касательной и нормальной осей.

Рассмотрим систему сил, действующих на материальную точку пласта. Силу тяги агрегата разложим на две составляющие вдоль осей F_{τ} и F_n :

$$\sum F_{k\tau} = 0; \quad F_{\tau} - F_{\tau p} - m_{пч}g \sin \psi = 0. \quad (31)$$

$$\sum F_{kn} = 0; \quad N - F_n - m_{пч}g \cos \psi = 0. \quad (32)$$

где $m_{пч}$ – масса материальной точки пласта, кг.

Откуда сила тяги:

$$F_{\tau} = F_{\tau p} + m_{пч}g \sin \psi = fN + m_{пч}g \sin \psi. \quad (33)$$

Определим N :

$$N = F_n + m_{пч}g \cos \psi = F_0 \sin \psi + m_{пч}g \cos \psi, \quad (34)$$

где F_0 – сила тяги плуга, Н.

Подставив равенство (34) в (33), получим силу тяги:

$$F_{\tau} = f(F_0 \sin \psi + m_{пч}g \cos \psi) + m_{пч}g \sin \psi$$

$$= fF_0 \sin \psi + m_{пч}g(f \cos \psi + \sin \psi). \quad (35)$$

При $\psi=0$, сила тяги действующая на пласт почвы будет равна тяге плуга в случае покоя:

$$F_{\tau} = f m_{пч}g = Nf = F_{\tau p}. \quad (36)$$

Вход пласта на плуг происходит при 30° , а сход при 90° .

При $\psi = \frac{\pi}{2}$ из равенства (34) имеем:

$$F_{\tau} = fF_0 + m_{пч}g. \quad (37)$$

При сходе пласта с поверхности плуга $f = 0$ и следовательно:

$$F_{\tau} = m_{пч}g. \quad (38)$$

В формулах (28) и (29) разложим $e^{\lambda_i t}$ ($i = 1, 2$) в ряд Тейлора, ограничиваясь линейными членами. Тогда равенство (28) можно записать в виде:

$$s = \frac{1}{\sqrt{A^2+4B}} [E[\lambda_2(1 + \lambda_1 t_1) - \lambda_1(1 + \lambda_2 t_1)] + v_{\text{по}}(1 + \lambda_1 t_1 - 1 - \lambda_2 t_1)] = \frac{1}{\sqrt{A^2+4B}} [E(\lambda_2 - \lambda_1) + v_{\text{по}}] + \frac{1}{\sqrt{A^2+4B}} [v_{\text{по}}(\lambda_1 - \lambda_2)]. \quad (39)$$

Откуда найдем время движения пласта почвы по отвалу корпуса плуга:

$$\frac{t_1}{\sqrt{A^2 + 4B}} [v_{\text{по}} (\lambda_1 - \lambda_2)] = s - \frac{1}{\sqrt{A^2 + 4B}} [E(\lambda_2 - \lambda_1) + v_{\text{по}}].$$

т.е.

$$t_1 = \frac{s\sqrt{A^2 + 4B} - E(\lambda_2 - \lambda_1) - v_{\text{по}}}{v_{\text{по}} (\lambda_1 - \lambda_2)}. \quad (40)$$

Зная время движения пласта по отвалу, определяемое по формуле (40), по формуле (29) можно определить его скорость $v_{\text{п}} = \dot{s}$ вдоль траектории s , в том числе и скорость на кромке отвала, которая в момент времени t_1 будет равна .

С помощью формул (14), (29), (34), (40) можно исследовать кинематику движения пласта, закономерность изменения его скорости движения по поверхности плуга в зависимости от изменения угла ψ .

Как видно из *рисунка 3*, скорость точек пласта относительно корпуса плуга в начальный момент времени резко падает, что связано с началом деформации почвенного пласта на лемехе плуга (сгруживание). Далее почва попадает на отвал и начинает ускоряться.

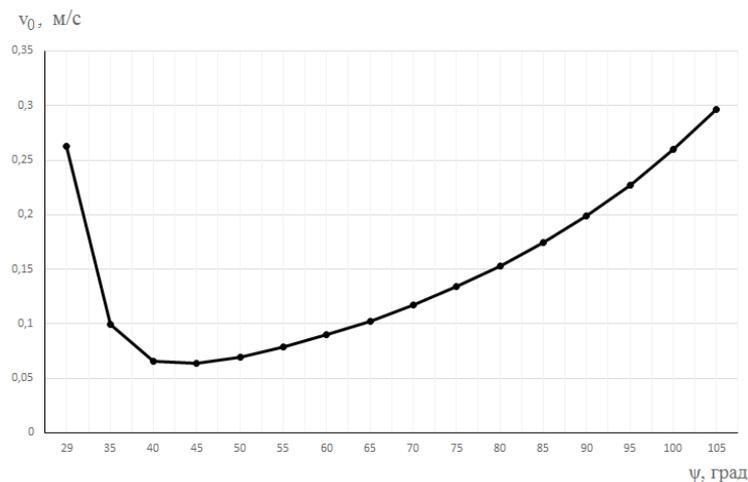


Рисунок 3. Зависимость скорости движения пласта от его положения на корпусе плуга (угла ψ)

Согласно *рисунку 4* сила тяги пласта на поверхности плуга по траектории циклоиды так же растет до 85° , после чего начинает падать.

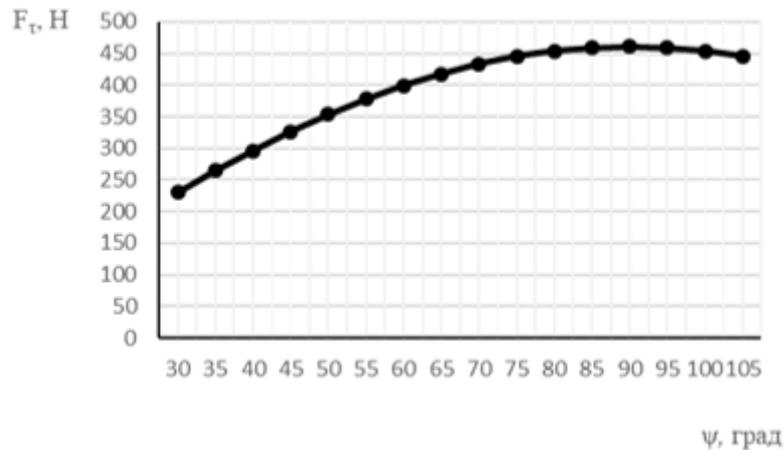


Рисунок 4. Зависимость силы тяги от угла наклона траектории

При построении графиков учитывался максимально возможный путь материальной точки пласта. Построены зависимости изменения скорости движения пласта от скорости агрегата (рис. 5) и пути, пройденного по траектории (рис. 6).

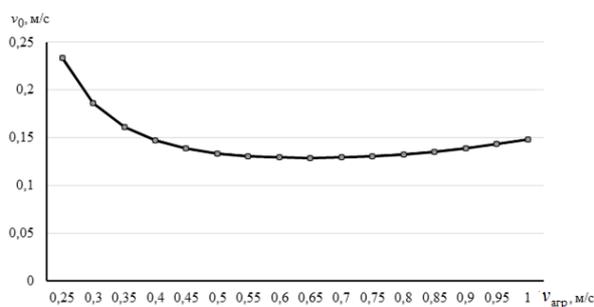


Рисунок 5. Зависимость скорости движения пласта на выходе с отвала от скорости движения плуга

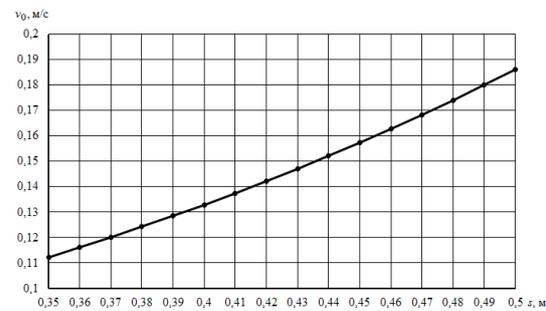


Рисунок 6. Зависимость скорости v₀ от длины пути s

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 координат (рис. 7). Начальная скорость полета частицы пласта будет равна ее конечной скорости на кромке отвала, которую можно получить из формулы (27) или (28) подставив в нее время движения частицы почвы по отвалу.

Полет пласта почвы при отсутствии сил сопротивления воздуха можно описать уравнениями движения [15]:

$$\begin{aligned}
 m_{\text{п}} \ddot{x} &= 0, \\
 m_{\text{п}} \ddot{y} &= 0, \\
 m_{\text{п}} \ddot{z} &= -mg.
 \end{aligned}
 \tag{41}$$

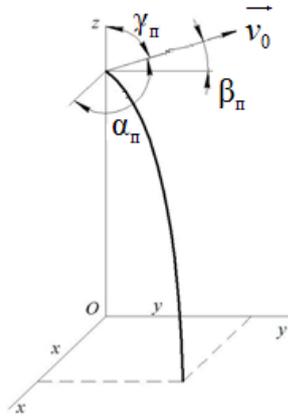


Рисунок 7. Траектория движения пласта почвы

После интегрирования имеем:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= c_1, \\ x &= c_1 t_2 + c_2, \\ \dot{y} &= c_3, \\ y &= c_3 t_2 + c_4, \\ \ddot{z} &= -gt_2 + c_5, \\ z &= -\frac{gt_2^2}{2} + c_5 t_2 + c_6. \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

где t_2 – время полета частицы почвы, с.

При $t_2 = 0, z = h_0, v = v_0$, (h_0 – высота от поверхности почвы до кромки отвала, м).

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_0 &= v_0 \cos \alpha_{\pi}; & x_0 &= 0, \\ \dot{y}_0 &= v_0 \cos \beta_{\pi}; & y_0 &= 0, \\ \dot{z}_0 &= v_0 \cos \gamma_{\pi}; & z_0 &= h_0. \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

Найдем c_i ($i = 1...6$):

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= v_0 \cos \alpha_{\pi}, \\ c_2 &= 0, \\ c_3 &= v_0 \cos \beta_{\pi}, \\ c_4 &= 0, \\ c_5 &= v_0 \cos \gamma_{\pi}, \\ c_6 &= h_0. \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

Подставим значения (44) в (42), получим уравнения движения:

$$\left\{ \begin{aligned} x &= v_0 t_2 \cos \alpha_{\pi}, \\ y &= v_0 t_2 \cos \beta_{\pi}, \\ z &= -\frac{gt_2^2}{2} + v_0 t_2 \cos \gamma_{\pi} + h_0. \end{aligned} \right. \quad (45)$$

Из первых 2-х уравнений (45) получим:

$$x + y = t_2 v_0 (\cos \alpha_{\pi} + \cos \beta_{\pi}),$$

откуда:

$$t_2 = \frac{x + y}{v_0(\cos \alpha_{\Pi} + \cos \beta_{\Pi})}. \quad (46)$$

Подставим равенство (46) в третье уравнение (45) получим уравнение траектории:

$$z = \frac{g(x + y)^2}{2v_0^2(\cos \alpha_{\Pi} + \cos \beta_{\Pi})^2} + \frac{\cos \gamma_{\Pi}(x + y)}{\cos \alpha_{\Pi} + \cos \beta_{\Pi}} + h_0. \quad (47)$$

Определим время падения пласта почвы из третьего уравнения (45), принимая $z = 0$:

$$\begin{aligned} 0 &= -\frac{gt_2^2}{2} + v_0 t_2 \cos \gamma_{\Pi} + h_0, \\ gt_2^2 - 2v_0 t_2 \cos \gamma_{\Pi} - 2h_0 &= 0, \\ t_2 &= \frac{2v_0 \cos \gamma_{\Pi} \pm \sqrt{4v_0^2 \cos^2 \gamma_{\Pi} + 8gh_0}}{2g}. \end{aligned} \quad (48)$$

Время падения будет соответствовать положительному значению выражения (48). Как видно из формулы (48), 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 $\gamma_{\Pi} = \frac{\pi}{2}$ имеем минимальное времени падения:

$$t_2 = \frac{\sqrt{2gh_0}}{g}. \quad (49)$$

Изменение времени падения, определяемого по зависимостям (48) (при м/с) и (49), представлено на рисунке 8.

Полагая, что поступательное движение плуга осуществляется вдоль оси y, определим координату (x; y) места падения пласта почвы на поверхность поля. Учитывая равенство (49), из первых двух уравнений (45) получим:

$$\begin{cases} x = \frac{v_0 \sqrt{2gh_0}}{g} \cos \alpha_{\Pi} \\ y = \frac{v_0 \sqrt{2gh_0}}{g} \cos \beta_{\Pi} \end{cases}. \quad (50)$$

Отметим, что углы α , β , γ задаются конструктивными параметрами плуга (кромки отвала). Полученные значения координат будут показывать ближайшую к корпусу точку, поэтому к окончательному значению необходимо добавить высоту пласта (глубину обработки).

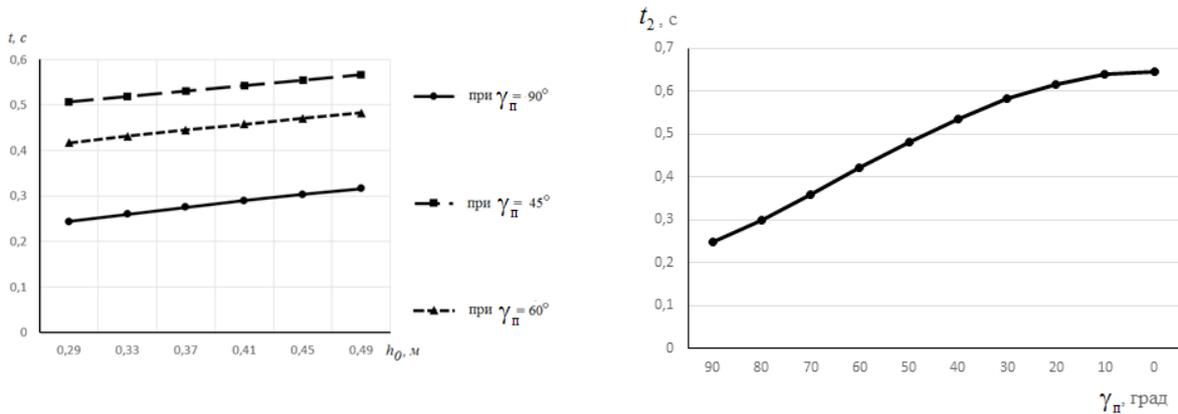


Рисунок 8. Зависимости времени полета частицы t от высоты h_0 (а) угла γ_n (б)

На рисунке 9 показана зависимость дальности полета частицы от скорости корпуса плуга и траектории движения частицы, представлены графики, построенные на основании результатов расчета дальности падения частиц почвы, сошедших с кромки отвалов корпусов в зависимости от скорости движения плуга: а при принятой траектории движения почвы по отвалу в виде дуги окружности (поверхность отвала имеет постоянный радиус кривизны) [10], б при принятой траектории движения почвы по отвалу в виде дуги окружности с учетом экспериментального поправочного коэффициента [10]; в при принятой траектории движения почвы по отвалу в виде циклоиды на основании полученных в статье формул. Очевидно, что наиболее приближен к реальному поведению почвенного пласта график (в), так как у при повышении скорости пласт начинает лучше крошиться и равномерно распределяется по борозде.

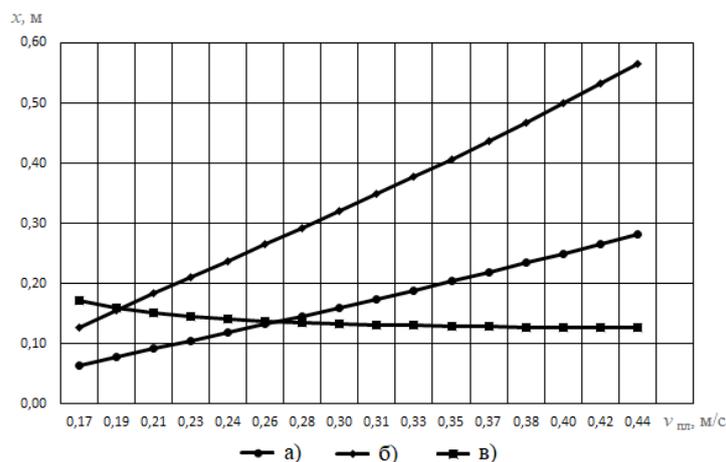


Рисунок 9. Зависимость дальности полета частицы от скорости движения корпуса плуга и принятой траектории

Выводы

В результате проведенных теоретических исследований получено уравнение движения пласта по отвалу в зависимости от скорости агрегата, характеризующего кривизну траектории угла, и 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.

Полученные результаты могут быть использованы в области сельскохозяйственного машиностроения при проектировании оборотных плугов и дополнительных орудий, предназначенных для поверхностной обработки почвенных пластов к ним.

Список литературы:

1. Сельскохозяйственные машины. Практикум: учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по агрономическим специальностям / Э.В. Заяц [и др.] ; ред. Э.В. Заяц. 2-е изд., доп. и испр. – Минск : ИВЦ Минфина, 2014. – 432 с.
2. Заяц, Э.В. Сельскохозяйственные машины : учебник для студентов учреждений высшего образования по агрономическим специальностям / Э.В. Заяц. – Минск: ИВЦ Минфина, 2016. – 428 с.
3. Капустин, В.П. Сельскохозяйственные машины : учебное пособие / В.П. Капустин. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2016. – 280 с.
4. Непарко, Т.А. Технологии и техническое обеспечение производства продукции растениеводства : учебное пособие для студентов учреждений высшего образования группы специальностей «Агроинженерия» / Т.А. Непарко, А.В. Новиков, И.Н. Шило ; под общ. ред. Т.А. Непарко. – Минск : ИВЦ Минфина, 2015. – 199 с.
5. Щеголихина, О.В. Почвообразование, состав и особенности почв: практическое пособие для студентов специальности 1-75 01 01 «Лесное хозяйство» / О.В. Щеголихина, Н.В. Митин. – Гомель : ГГУ, 2017 – 47 с.
6. Лепешкин, Н.Д. Преимущества и недостатки вспашки в борозде и вне борозды / Н.Д. Лепешкин, Ф.И. Назаров, Д.В. Заяц // Белорусское сельское хозяйство. – 2014. – № 11. С. 92–94.
7. К обоснованию динамических нагрузок, действующих на пахотный агрегат при навешивании на раму плуга катковых приставок / Ф.И. Назаров [и др.] // Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь : збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції, Житомир, 28-29, березня 2018 р. Житомирський агротехнічний коледж; ред.: М.М. Тимошенко [и др.]. – Житомир, 2018. – С. 263–266.
8. Эффективность использования катковых приставок в пахотных агрегатах / С.Н. Герук [и др.] // Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь : збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної конференції, Житомир, 29-30, березня 2017 р. Житомирський агротехнічний коледж ; ред.: М.М. Тимошенко [и др.]. – Житомир, 2017. – С. 220–223.
9. Назаров, Ф.И. Совмещение операций основной и поверхностной обработки почвы / Ф.И. Назаров, И.С. Крук, Ю.В. Чигарев // Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь : збірник тез II Всеукраїнської науково-практичної конференції, Житомир, 78 квітня 2016 р. Житомирський агротехнічний коледж ; ред.: М.М. Тимошенко [и др.]. – Житомир, 2016. – С. 10–15.
10. Проектирование катковых приставок для пахотных агрегатов. Рекомендации / И.С. Крук, Ф.И. Назаров, Ю.В. Чигарев, Г.Ф. Назарова, С.К. Карпович, Л.А.

Маринич, Н.Г. Бакач, Н.Д. Лепешкин. – Минск: БГАТУ, 2017. – 104 с.

11. Определение параметров движения частиц почвенного пласта в процессе обработки оборотными плугами / И.С. Крук [и др.] // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию со дня образования РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», Минск, 1820 октября 2017 г. РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» ; редкол.: П.П. Казакевич (гл.ред) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 138-142.

12. Обоснование параметров установки дополнительных орудий для поверхностной обработки почвенных пластов в пахотных агрегатах / И.С. Крук [и др.] // Агропанорама. – 2017. – № 6. – С. 1016.

13. Чигарев, Ю.В. Кинематические исследования движения почвенного пласта по поверхности корпуса плуга для обоснования параметров установки дополнительных почвообрабатывающих орудий в пахотных агрегатах / Ю.В. Чигарев, И.С. Крук, В. Романюк, Ф.И. Назаров // Проблемы интенсификации животноводства с учетом охраны окружающей среды и производства альтернативных источников энергии, в том числе биогаза: сб. ст. Институт технологических и естественных наук в Фалентах, отделения в Варшаве; редкол.: В. Романюк. Фаленты ; Варшава, 2017. – С. 38-46.

14. Гордеенко, О.В. Согласование технологических параметров дополнительных орудий при основной обработке почвы машинно-тракторными агрегатами с оборотными плугами / О.В. Гордеенко, И.С. Крук, Назаров Ф.И. // Передовые технологии и техническое обеспечение сельскохозяйственного производства: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 30-31 марта 2017 г. Минск: БГАТУ, 2017. С. 365-369.

15. Чигарев, А.В. Теоретическая механика: решение задач: учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по техническим специальностям / А.В. Чигарев, Ю.В. Чигарев, И.С. Крук. – Минск : ИВЦ Минфина, 2016. – 477 с.

References

1. Zayats E.V. and others. Sel'skokhozyaystvennyye mashiny. Praktikum: uchebnoye posobie dlya studentov uchrezhdeniy vysshego obrazovaniya po agronomicheskim spetsial'nostyam [Agricultural Machinery. Laboratory Manual: Textbook for Students of Institutions of Higher Education for Agricultural Specialties]. Minsk, IVTs of the Ministry of Finance, ed. by Zayats E. V., 2nd ed., Ext. and rev., 2014. 432 p.

2. Zayats E.V. Sel'skokhozyaystvennyye mashiny: uchebnik dlya studentov uchrezhdeniy vysshego obrazovaniya po agronomicheskim spetsial'nostyam [Agricultural Machinery: Textbook for Students of Institutions of Higher Education for Agricultural Specialties]. Minsk: IVTs of the Ministry of Finance, 2016. 428 p.

3. Kapustin V.P. Sel'skokhozyaystvennyye mashiny: uchebnoye posobie [Agricultural Machines: Study Guide]. Moscow, NITs INFRA-M, 2016. 280 p. (In Russian)

4. Neparko T. A., Novikov A. V., Shilo I. N. Tekhnologii i tekhnicheskoe obespechenie proizvodstva produktsii rastenievodstva: uchebnoye posobie dlya studentov uchrezhdeniy vysshego obrazovaniya gruppy spetsial'nostey "Agroinzheneriya" [Technologies and Technical Support of Crop Production: Study Guide for Students of Institutions of Higher Education for Specialties "Agroengineering"]. Minsk, IVTs of the Ministry of Finance, total ed. by Neparko T. A., 2015. 199 p.

5. Shchegolikhina O. V., Mitin N. V. Pochvoobrazovanie, sostav i osobennosti pochv:

prakticheskoe posobie dlya studentov spetsial'nosti 1-75 01 01 «Lesnoe khozyaystvo» [Soil Formation, Soil Composition and Features: Practical Guide for Students of the Specialty 1-75 01 01 "Forestry"]. Gomel, GGU, 2017. 47 p.

6. Lepeshkin N. D., Nazarov F. I., Zayats D.V. Advantages and disadvantages of plowing in the furrow and outside the furrow. *Belorusskoe sel'skoe khozyaystvo* [Belarusian Agriculture], 2014, No. 11, pp. 9294.

7. Nazarov F. I. et al. On substantiation of dynamic loads acting on plowing unit when attaching the roller annexes to the plough frame. *Perspektivi i tendentsii rozvitku konstruktsiy ta tekhnichnogo servisu sil's'kogospodars'kikh mashin i znaryad*: zbirnik tez IV Vseukraïns'koï naukovo-praktichnoï konferentsii, ZHitomir, 28-29, bereznya 2018 r. ZHitomirs'kiy agrotekhnichniy koledzh; red.: M.M. Timoshenko [i dr.]. [Perspectives and Trends of Development of Construction Design and Technical Services for Agricultural Machines and Implements: Proceedings of the IV All-Ukrainian Scientific and Practical Conference, Zhytomyr, 28-29, Bereznya, 2018. The Zhytomyr Agrotechnical College; Ed.: Tymoshenko M. M. et al.]. Zhytomyr, 2018, pp. 263 - 266.

8. Geruk S. N. and others. Efficiency of roller annexes use in plowing units. *Perspektivi i tendentsii rozvitku konstruktsiy ta tekhnichnogo servisu sil's'kogospodars'kikh mashin i znaryad*: zbirnik tez III Vseukraïns'koï naukovo-praktichnoï konferentsii, ZHitomir, 29-30, bereznya 2017 r. ZHitomirs'kiy agrotekhnichniy koledzh; red.: M.M. Timoshenko [i dr.]. [Perspectives and Trends of Development of Construction Design and Technical Services for Agricultural Machines and Implements: Proceedings of the III All-Ukrainian Scientific and Practical Conference, Zhytomyr, 29-30, Bereznya, 2017. The Zhytomyr Agrotechnical College; Ed.: Tymoshenko M. M. et al.]. Zhytomyr, 2017, pp. 220 - 223.

9. Nazarov F. I., Kruk I. S., Chigarev Yu. V. Combining the operations of the main and surface soil tillage. *Perspektivi i tendentsii rozvitku konstruktsiy ta tekhnichnogo servisu sil's'kogospodars'kikh mashin i znaryad*: zbirnik tez II Vseukraïns'koï naukovo-praktichnoï konferentsii, ZHitomir, 78 kvitnya 2016 r. ZHitomirs'kiy agrotekhnichniy koledzh; red.: M.M. Timoshenko [i dr.]. [Perspectives and Trends of Development of Construction Design and Technical Services for Agricultural Machines and Implements: Proceedings of the II All-Ukrainian Scientific and Practical Conference, Zhytomyr, 7-8, Kvytya, 2016. The Zhytomyr Agrotechnical College; Ed.: Tymoshenko M. M. et al.]. Zhytomyr, 2016, pp. 10 - 15.

10. Kruk I. S., Nazarov F. I., Chigarev Yu. V., Nazarova G. F., Karpovich S. K., Marinich L. A., Bakach N. G., Lepeshkin N. D. Proektirovanie katkovykh pristavok dlya pakhotnykh agregatov. Rekomendatsii [Engineering of Roller Annexes for Plowing Units. Guidelines]. Minsk: BGATU, 2017. 104 p.

11. Kruk I. S., Nazarov F. I. et al. Determination of the parameters of soil particles movement in processing of reversible plows. *Nauchno-tekhnicheskiiy progress v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve: materialy Mezhdunar. nauch.-prak. konf., posvyashch. 70-letiyu so dnya obrazovaniya RUP «NPTs NAN Belarusi po mekhanizatsii sel'skogo khozyaystva»*, Minsk, 1820 oktyabrya 2017 g. RUP «NPTS NAN Belarusi po mekhanizatsii sel'skogo khozyaystva»; redkol.: P.P. Kazakevich (gl.red) [i dr.]. [Scientific and Technical Progress in Agricultural Production: Materials of the Intern. Scientific and Practical Conf., Dedicated to the 70th Anniversary of the Founding of the RUP "NPTs NAN of Belarus on Agriculture Mechanization", Minsk, October 1820, 2017; Editorial.: P.P. Kazakevich (main editor) et al.]. Minsk, 2017, pp. 138 142.

12. Kruk I. S. et al. Substantiation of installation parameters of additional implements for furrow slice surface treatment in plowing units. *Agropanorama* [Agropanorama],

2017, No. 6, pp. 1016.

13. Chigarev Yu. V., Kruk I. S., Romanyuk V., Nazarov F.I. Kinematic studies of the furrow slice movement on the surface of the plough body to substantiate the installation parameters of additional tillage implements in plowing units. Problemy intensifikatsii zhivotnovodstva suchetom okhrany okruzhayushchey sredy i proizvodstva al'ternativnykh istochnikov energii, v tom chisle biogaza: sb. st. Institut tekhnologicheskikh i estestvennykh nauk v Falentakh, otdeleniya v Varshave; redkol.: V. Romanyuk [Problems of Animal Husbandry Intensifying Taking into Account Environmental Protection and Production of Alternative Energy Sources, Including Biogas. Collected Papers of the Institute of Technological and Natural Sciences in Falenta, Offices in Warsaw; Editorial: V. Romanyuk]. Falenty - Warsaw, 2017, pp. 38 - 46.

14. Gordeenko O. V., Kruk I. S., Nazarov F. I. Coordination of technological parameters of additional implements during the main soil tillage with machine-tractor units with reversible plows. Peredovye tekhnologii i tekhnicheskoe obespechenie sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Minsk, 30-31 marta 2017 g. [Advanced Technologies and Technical Support of Agricultural Production: Materials of the Intern. Scientific and Practical Conf., Minsk, March 30-31, 2017]. Minsk, BGATU, 2017, pp. 365-369.

15. Chigarev A. V., Chigarev Yu. V., Kruk I. S. Teoreticheskaya mekhanika: reshenie zadach: uchebnoe posobie dlya studentov uchrezhdeniy vysshego obrazovaniya po tekhnicheskim spetsial'nostyam [Theoretical Mechanics: Problem Solving: Study Guide for Students of Higher Education Institutions in Technical Specialties]. Minsk, IVTs of the Ministry of Finance, 2016. 477 p.

Substantiation of Installation Parameters of Additional Soil Tilling Implements in Plowing Units due to the Movement of the Furrow Slice on the Surfaces of the Plough Body

Chigarev Yuriy Vlasovich, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor
e-mail: peter.savinyh@mail.ru

The Educational Establishment the Belarusian State Agrarian Technical University,
Minsk, the Republic of Belarus

The West Pomor University of Technology, Schetin, the Republic of Poland

Savinykh Peter Alekseevich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of
Laboratory

e-mail: peter.savinyh@mail.ru

The Federal State Budgetary Scientific Institution the Federal Agricultural Research
Center of the North-East named after N.V. Rudnitskiy

Nazarov Fedor Igorevich, an assistant lecturer

e-mail: peter.savinyh@mail.ru

The Educational Establishment the Belarusian State Agrarian Technical University,
Minsk, the Republic of Belarus

Kruk Igor Stepanovich, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor,
Dean of the Faculty for Mechanization

e-mail: Kruk_Igar@mail.ru

The Educational Establishment the Belarusian State Agrarian Technical University,
Minsk, the Republic of Belarus

Romanyuk Vatslav, Doctor of Science (Engineering), Professor

e-mail: peter.savinyh@mail.ru

The Institute of Technological and Natural Sciences of Falenta, the Department in
Warsaw, the Republic of Poland

Abstract. The article represents the equation of furrow slice movement along the moldboard depending on the speed of the unit, it characterizes the curvature of the angle trajectory, the gravity force of the furrow slice, the applied traction force and the resistance force caused by rehandling of the furrow slice particles as it rolls up along the moldboard. Analytical expressions are obtained for determining the time of the furrow slice movement along the moldboard, the coordinates of the furrow slice fall on the field surface and the estimation of the fall time. The results can be used in the field of agricultural engineering in the design of reversible ploughs and additional implements for soil surface treatment.

Keywords: plough, implement, tilling, furrow slice, particle, force, speed, movement, trajectory, dependence.