

Взаимодействие компонентов вороха корнеплодов с витком шнека и вальцом шнеково-вальцового очистителя

В.М. Мартынов, д.т.н., профессор, Г.П. Юхин, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ

В Башкирском ГАУ разработан шнеково-вальцовый очиститель (рис. 1), способный одновременно очищать от почвы и растительных примесей и перемещать корнеплоды на значительную высоту. Очиститель представляет собой винтовой конвейер с жёлобом, выполненным в виде расположенных с зазором относительно друг друга продольных планок [1–3]. Подъём вороха корнеплодов обеспечивается за счёт установки конвейера под углом к горизонту. В процессе работы ворох корнеплодов перемещается по образующей жёлоба в сторону вращения двухзаходной винтовой спирали конвейера, где размещены два вальца с винтовой навивкой.

В этой зоне и происходит эффективная очистка корнеплодов от свободной и связанной почвы, а также растительных примесей.

Материал и методы исследования. Для обоснования конструктивных и кинематических параметров шнеково-вальцового очистителя требуется комплексное рассмотрение поведения компонентов вороха при их взаимодействии с витком шнека и обрешёткой, а также с одним и двумя вальцами. Более ранними исследованиями рассмотрен закон движения компонента вороха при его взаимо-

действии с витком шнека и образующей жёлоба [4, 5]. Также установлено, что предпочтительным вариантом является вращение вальцов и шнека конвейера в одном направлении [5, 6].

Весьма важно установить закономерности движения компонента вороха при достижении им основной зоны очистки, образованной двумя вальцами. Для этого корнеплоду или комку почвы необходимо пройти путь по образующей нижнего вальца, чему способствует приобретённая им ско-



Рис. 1 – Шнеково-вальцовый очиститель вороха корнеплодов в составе комбайна

рость в результате движения по жёлобу винтового конвейера, а препятствует встречное вращение вальца. Поэтому необходимо рассмотреть случай движения компонента вороха корнеплодов в шнеково-вальцовом очистителе, когда он находится на нижнем очищающем вальце.

Поставленная задача решалась с помощью теоретических методов исследования.

Результаты исследования. Рассмотрим компонент вороха (тело), взаимодействующий с витком шнека и вальцом (рис. 2). Для упрощения последующих рассуждений примем допущение, что компонент вороха не вращается, не опрокидывается и не вертится относительно главных осей инерции. Будем считать, что корнеплод занимает наиболее устойчивое положение, когда его главная центральная ось инерции ориентирована вдоль оси шнека. Примем две системы координат – неподвижную $Oxuz$ и подвижную $Ox_1y_1z_1$, поворачивающуюся вокруг оси Oz_1 , причём плоскость Ox_1z_1 проходит через центр масс рассматриваемого тела. Оси Oz и Oz_1 совпадают с осью вращения вальца. Их месторасположение характеризуется расстоянием l и углом ε_{e1} относительно оси вращения шнека.

В случае безотрывного движения тела по вальцу его центр масс вращается относительно оси Oz_1 с постоянным радиусом r_1 . Координаты центра масс тела равны:

$$x=r_1\cos\theta; y=r_1\sin\theta; z=a_b\varphi, \quad (1)$$

где θ – угол отклонения тела от горизонтальной оси Ox ; a_b – параметр конвейера; $\varphi=\omega_0t+\varepsilon_0-\varepsilon$ – угол поворота витка шнека относительно рассматриваемого тела; ω_0 – угловая скорость вращения шнека; t – время; $\varepsilon_0, \varepsilon$ – начальный и текущий угол отклонения тела от вертикали.

По рисунку 2 нетрудно заметить, что

$$\left. \begin{aligned} r \sin(\varepsilon - \varepsilon_{e1}) &= r_1 \sin\theta - \pi/2 + \varepsilon_{b1} = -r_1 \cos\theta + \varepsilon_{e1}; \\ r \cos(\varepsilon - \varepsilon_{e1}) + r_1 \cos\theta - \pi/2 + \varepsilon_{b1} &= 1. \end{aligned} \right\} (2)$$

Тогда из выражения (2) определяется текущий угол:

$$\varepsilon = \varepsilon_{b1} - \arctg\{r_1 \cos(\theta + \varepsilon_{b1}) / [l - r_1 \sin(\theta + \varepsilon_{b1})]\}. \quad (3)$$

Подставив это выражение для ε в выражении (1), получим:

$$z = a_b \left\{ \begin{aligned} &\omega_0 t + \varepsilon_0 - \varepsilon_{e1} + \\ &+ \arctg\left[\frac{r_1 \cos(\theta + \varepsilon_{b1})}{l - r_1 \sin(\theta + \varepsilon_{b1})} \right] \end{aligned} \right\}$$

Дважды продифференцировав уравнения (1) по времени t , определим проекции скоростей $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ и ускорений на координатные оси $Oxuz$:

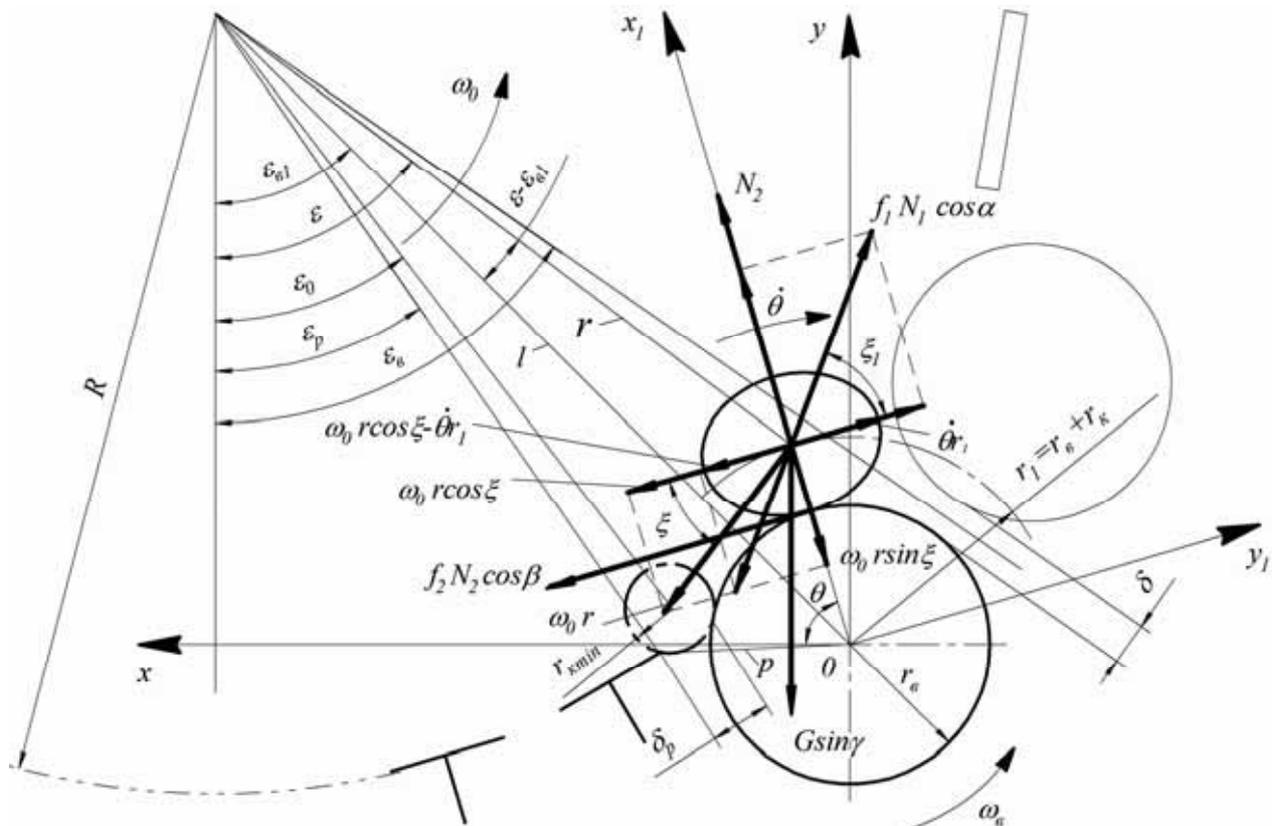


Рис. 2 – Схема сил, приложенных к компоненту вороха при его взаимодействии с витком шнека и вальцом

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{d^2x}{dt^2} = -r_1(\sin\theta \cdot \ddot{\theta} + \cos\theta \cdot \dot{\theta}^2); \\ \ddot{y} &= \frac{d^2y}{dt^2} = r_1(\cos\theta \cdot \ddot{\theta} - \sin\theta \cdot \dot{\theta}^2); \\ \ddot{z} &= \frac{d^2z}{dt^2} = a_6 r_1 \times \\ &\times \left\{ \frac{\ddot{\theta}}{(l^2 - r_1^2)[r_1 - l \sin(\theta + \varepsilon_{61})] + 2r_1} - \frac{\dot{\theta}^2(l^2 - r_1^2) \cdot l \cdot \cos(\theta + \varepsilon_{61})}{[l^2 + r_1^2 - 2r_1 l \sin(\theta + \varepsilon_{61})]^2} \right\} \end{aligned} \right\} (4)$$

В проекциях на оси координат $Ox_1y_1z_1$ имеем следующие ускорения:

$$\ddot{x}_1 = r_1 \dot{\theta}^2; \quad \ddot{y}_1 = r_1 \ddot{\theta}; \quad \ddot{z}_1 = \ddot{z}. \quad (5)$$

На компонент вороха массой m при его взаимодействии с витком шнека и вальцом действуют: сила тяжести G , нормальные реакции со стороны витка шнека N_1 и вальца N_2 ; силы трения о поверхность винта $f_1 N_1$ и поверхность вальца $f_2 N_2$, где f_1, f_2 – коэффициенты трения компонента вороха корнеплодов соответственно о поверхность винта и вальца.

Проецируя все действующие силы на подвижные оси координат, запишем дифференциальные уравнения движения тела на вальце и шнеке винтового конвейера, установленного под углом γ к вертикали:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x}_1 &= N_2 - G \sin \gamma \sin \theta + N_1 \sin \alpha \sin \zeta + \\ &+ f_1 N_1 \cos \alpha \sin \zeta_1; \\ m\ddot{y}_1 &= f_1 N_1 \cos \alpha \cos \zeta_1 - G \sin \gamma \cos \theta - \\ &- f_2 N_2 \cos \beta + N_1 \sin \alpha \cos \zeta; \\ m\ddot{z}_1 &= -G \cos \gamma + N_1 \cos \alpha - f_1 N_1 \sin \alpha - \\ &- f_2 N_2 \sin \beta. \end{aligned} \right\} (6)$$

С учётом относительных скоростей рассматриваемого тела и вальца справедливы выражения:

$$\cos \beta =$$

$$= \left[1 + \left\{ \frac{a_6}{r_6(\dot{\theta} + \omega_6)} \left[\omega_0 + r_1 \dot{\theta} / \left(\frac{l^2 - r_1^2}{r_1 - l \sin(\theta + \varepsilon_{61})} + 2r_1 \right) \right] \right\}^2 \right]^{1/2};$$

$$\sin \beta =$$

$$= \left[1 + \left\{ \frac{r_6(\dot{\theta} + \omega_6)}{a_6 \left[\omega_0 + r_1 \dot{\theta} / \left(\frac{l^2 - r_1^2}{r_1 - l \sin(\theta + \varepsilon_{61})} + 2r_1 \right) \right]} \right\}^2 \right]^{-1/2},$$

где r_6 – радиус вальца.

По рисунку 2 замечаем следующую связь углов:

$$\begin{aligned} \xi &= \varepsilon + \theta - \pi/2 = \varepsilon_{61} - \\ &- \arctg \left\{ r_1 \cos(\theta + \varepsilon_{61}) / [l - r_1 \sin(\theta + \varepsilon_{61})] \right\} + \theta - \pi/2. \end{aligned}$$

Для угла ξ_1 , характеризующего относительные скорости компонента вороха и винта шнека, справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \sin \xi_1 &= \\ &= \omega_0 r \sin \xi / \sqrt{(\omega_0 r \sin \xi)^2 + (\omega_0 r \cos \xi - \dot{\theta} r_1)^2}; \\ \cos \xi_1 &= \\ &= (\omega_0 r \cos \xi - \dot{\theta} r_1) / \sqrt{(\omega_0 r \sin \xi)^2 + (\omega_0 r \cos \xi - \dot{\theta} r_1)^2}. \end{aligned}$$

Так как $a_6 = r \cdot \operatorname{tg} \alpha$ с учётом (2) и (3) получим текущий угол подъёма винтовой линии шнека для радиуса r :

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left[a_6 / \sqrt{r_1^2 + l^2 - 2r_1 l \sin(\theta + \varepsilon_{61})} \right].$$

Исключив нормальные реакции в (6) и с учётом $G = m \cdot g$ и (4) – (6), после преобразований окончательно получим

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\theta} &= \\ &= \frac{S_4(g \sin \gamma \cos \theta - S_0 S_1 / S_2) - S_3[(g \cos \gamma - S_6 a_6 r_1) S_2 - S_5]}{r_1(S_2 S_3 a_6 / S_7 - S_4)}; \\ \ddot{z}_1 &= a_6 r_1 (\ddot{\theta} / S_7 - S_6), \end{aligned} \right\} (7)$$

где

$$\begin{aligned} S_0 &= g \sin \gamma \cdot \sin \theta - r_1 \dot{\theta}^2; \\ S_1 &= f_1 \cos \alpha \cdot \cos \xi_1 + \sin \alpha \cdot \cos \xi; \\ S_2 &= \sin \alpha \cdot \sin \xi + f_1 \cos \alpha \cdot \sin \xi_1; \\ S_3 &= f_2 \cos \beta + S_1 / S_2; \\ S_4 &= \cos \alpha - f_1 \sin \alpha + f_2 \sin \beta \cdot S_2; \\ S_5 &= (\cos \alpha - f_1 \sin \alpha) \cdot S_0; \\ S_6 &= \frac{\dot{\theta}^2(l^2 - r_1^2) \cdot l \cdot \cos(\theta + \varepsilon_{61})}{[l^2 + r_1^2 - 2r_1 l \sin(\theta + \varepsilon_{61})]^2}; \\ S_7 &= \frac{l^2 - r_1^2}{r_1 - l \cdot \sin(\theta + \varepsilon_{61})} + 2r_1. \end{aligned}$$

Для заданного месторасположения двух смежных вальцов, определяемого углом ε_6 , угол установки нижнего равен:

$$\varepsilon_{61} = \varepsilon - \operatorname{arcsin}[(r_b - \delta/2)/l],$$

где δ – зазор между ними. Размещение смежной к нижнему вальцу планки жёлоба:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{61} - \operatorname{arccos}[(l^2 + R^2 - p^2)/(2Rl)],$$

где R – радиус желоба. Расстояние p вычислим из условия размещения корнеплода минимальных размеров радиуса r_{\min} в зазоре δ_p .

Уравнения (7) решаются с начальными условиями:

$$\begin{aligned} \theta_0 &= \operatorname{arccos}[(r_1^2 + p^2 - r_k^2)/(2r_1 p)]; \\ \dot{\theta}_0 &= \frac{\dot{\varepsilon}_0(R - r_k)}{2r_1} \sqrt{\frac{(r_1 + r_k)^2 - p^2}{r_1 r_k}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где r_k – радиус компонента вороха; $\dot{\varepsilon}_0$ – начальная угловая скорость движения компонента вороха.

Конечный угол определим из условия достижения телом условной границы, которой служит верхний валец:

$$\theta_k = \pi/2 - \varepsilon_0 + \arcsin[(r_0 + \delta/2)/r_1].$$

Если же рассматривать движение компонента вороха по верхнему валцу, то границей служит установленный над ним оградительный щиток.

Уравнения (7) описывают безотрывное движение компонента вороха по очищающему валцу. При их численном решении необходимо следить за значением реакции N_2 , которая должна быть положительной. В противном случае происходит отрыв компонента вороха от валца, и закон его дальнейшего движения при взаимодействии только с винтом шнека описывается системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{r} &= r\dot{\varepsilon}^2 + g \sin \gamma \cos \varepsilon - p_1 n_1 \dot{r}; \\ \ddot{\varepsilon} &= \\ &= \left[g \cos \gamma + n_1 \left(p_1 (\omega_0 - \dot{\varepsilon}) a_0 - r / \sqrt{a_0^2 + r^2} \right) \right] / a_0; \\ z &= z_0 + a_0 (\omega_0 t + \varepsilon_0 - \varepsilon), \end{aligned} \right\}$$

где $n_1 = N_1/m$;

$$p_1 = f_1 / \sqrt{\dot{r}^2 + (r^2 + a_0^2)(\omega_0 - \dot{\varepsilon})^2}.$$

С помощью математической модели (7) исследовано влияние угла установки валцов ε_b на характер движения почвенного комка по поверхности нижнего валца. В расчётах приняты: $r_k = 0,025$ м; $r_0 = 0,05$ м; $R = 0,52$ м; $l = 0,565$ м; $a_0 = 0,105$ м; $f_1 = f_2 = 0,65$; $\omega_0 = 6,3$ рад/с; $\omega_b = 25,2$ рад/с; $\gamma = 65^\circ$.

На рисунке 3 показаны закономерности изменения проекции абсолютной скорости $V_{xy} = r_1 \dot{\theta}$ рассматриваемого тела на плоскости xOy в зависимости от угла расположения ε в винтовом конвейере. Кривая, изображённая тонкой линией, соответствует скорости движения комка почвы, которую он приобретает при движении по образующей жёлоба в момент подхода к первому валцу. При построении этой кривой принято, что движение тела начинается при угле $\varepsilon = 0$, угловой скорости $\dot{\varepsilon} = 0$ и скорости $V_{xy} = g\dot{\varepsilon}$.

В результате столкновения комка почвы с валцом его скорость уменьшается в соответствии с (8). Затем комок поднимается по валцу с уменьшением скорости V_{xy} . При угле установки валцов в меньше 43° комок, пройдя критическую точку, движется с ускорением, вызывающим повышение окружной скорости V_{xy} (кривые 1–3). При угле $\varepsilon_b = 44^\circ$ (кривая 4) комок почвы не в состоянии подняться на первый валец и вынужден опуститься на решётчатую поверхность жёлоба. Поэтому для

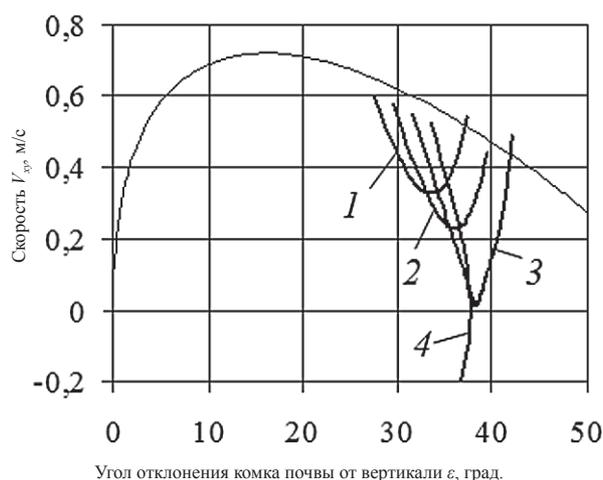


Рис. 3 – Изменение скорости почвенного комка в процессе его движения по поверхности валца при угле установки валцов: 1 – 38° ; 2 – 40° ; 3 – 42° ; 4 – 44°

его разрушения между валцами целесообразно принять угол их установки не более 43° [5, 6].

Исследованиями установлено, что при тех же углах установки валцов ε_0 корнеплоды, имеющие большие по сравнению с комками почвы значения коэффициентов трения ($f_1 = f_2 = 0,9$), подходят к первому валцу с большей начальной скоростью V_{xy} и значительно легче поднимаются на него.

Выводы. Математическое моделирование позволило установить закономерности движения компонента вороха корнеплодов при его взаимодействии с витком шнека и валцом и при принятых конструктивных и кинематических параметрах шнеково-валцового очистителя обосновать угол установки валцов, который не должен превышать 43° .

Литература

1. Патент 2338365. Российская Федерация. Корнеклубнеуборочный комбайн / Мартынов В.М., Юхин Г.П., Калимуллин А.М., Катков А.А.; заявитель и патентообладатель Башкирский ГАУ. № 2007109382/12; заявл. 14.03.07; опубл. 20.11.08. Бюл. № 32. 7 с. 2. Мартынов В.М., Юхин Г.П., Катков А.А., Калимуллин А.М. Комбайн для уборки корнеклубнеплодов // Сельский механизатор. 2006. № 10. С. 49.
3. Патент 2272394. Российская Федерация. Комбайн для уборки корнеклубнеплодов / Мартынов В.М., Юхин Г.П., Калимуллин А.М., Катков А.А. заявитель и патентообладатель Башкирский ГАУ. № 2004124393; заявл. 10.08.04; опубл. 27.03.06. Бюл. № 9. 6 с. 4. Юхин Г.П., Мартынов В.М., Катков А.А. Обоснование параметров винтового конвейера-очистителя корнеклубнеплодов // Сборник трудов факультета механизации сельского хозяйства (посвящается полувеклому юбилею факультета) / под редакцией А.П. Иофинова. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2001. С. 112–118.
5. Юхин Г.П., Карташов Л.П., Мартынов В.М., Катков А.А. Рекомендации по проектированию очистителей корнеклубнеплодов шнекового типа от почвы. М: Россельхозакадемия, 2005. 36 с.
6. Мартынов В.М. Проектирование рабочих органов и машин для уборки корнеплодов. Уфа: Изд-во Башкирского ГАУ, 2011. 250 с.