

При уборке на скорости  $1 \text{ м/с}$  двух рядков картофеля урожайностью  $40 \text{ т/га}$ , возделываемого на междурядьях  $70 \text{ см}$ , картофелекопалателем с шириной основного элеватора  $b_c = 1120 \text{ мм}$ , оборудованного вальцовым ворохоочистителем с  $\beta_a = 25^\circ$  и  $k_{\text{шт}} = 6$ , частота вращения вальцов составит  $452 \text{ мин}^{-1}$ .

### Выводы

В работе предложено аналитическое выражение для определения частоты вращения вальцов в зависимости от их геометрических параметров, производительности уборочной машины, схемы посадки, урожайности картофеля и размерно-весовых характеристик клубней. Частота вращения, рассчитанная по выражению (1) для условий работы ротационного ворохоочистителя, соответствующих  $b = 14 \text{ мм}$ ,  $d_{\text{кл}} = 28 \text{ мм}$  и  $h_n = 20 \text{ мм}$ , при значениях коэффициентов трения  $f' = 0,93$ ;  $f_{\text{max}} = 0,48$  при  $l_{\text{ст}}^{\text{max}} = 2 \text{ м}$  и диаметре вальцов  $d_a = 80 \text{ мм}$  составила  $452 \text{ мин}^{-1}$ .

05.06.2014

### Литература

1. Мацепуро, М.Е. Технологические основы механизации уборки картофеля / М.Е. Мацепуро. – Минск, 1959. – С. 302.
2. Физико-механические свойства растений, почв и удобрений. Методы исследований, приборы, характеристики / Б.А. Воронюк [и др.]. – М.: Колос, 1970. – С. 423.
3. Петров, Г.Д. Картофелеуборочные машины / Г.Д. Петров. – М.: Машиностроение, 1984. – С. 320.
4. Верещагин, Н.И. Рабочие органы машин для возделывания, уборки и сортирования картофеля / Н.И. Верещагин. – М.: Машиностроение, 1965. – 267 с.

УДК 631.356.46

**Д.И. Комлач, В.В. Голдыбан,  
И.М. Морозова**

*(РУП «НПЦ НАН Беларуси по  
механизации сельского хозяйства»,  
г. Минск, Республика Беларусь)*

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ  
ОБОСНОВАНИЕ ДЛИНЫ  
ВАЛЬЦОВ РОТАЦИОННОГО  
ВОРОХООЧИСТИТЕЛЯ<sup>2</sup>**

### Введение

Рассмотрим основные этапы, которые проходит картофельный ворох в зоне ботвоотделения. На первом этапе (рисунок 84) происходит отрыв частиц вороха от поверхности пруткового элеватора в точках  $O_k$  –

---

<sup>2</sup> Термины и обозначения, а также численные значения показателей, используемых в этой статье, даны в статьях «Теоретическое обоснование диаметра вальцов ротационного ворохоочистителя», «Теоретическое обоснование угла наклона и частоты вращения ротационного ворохоочистителя» настоящего сборника.

для клубней,  $O_b$  – для свободной листостебельной массы (ботвы картофеля).

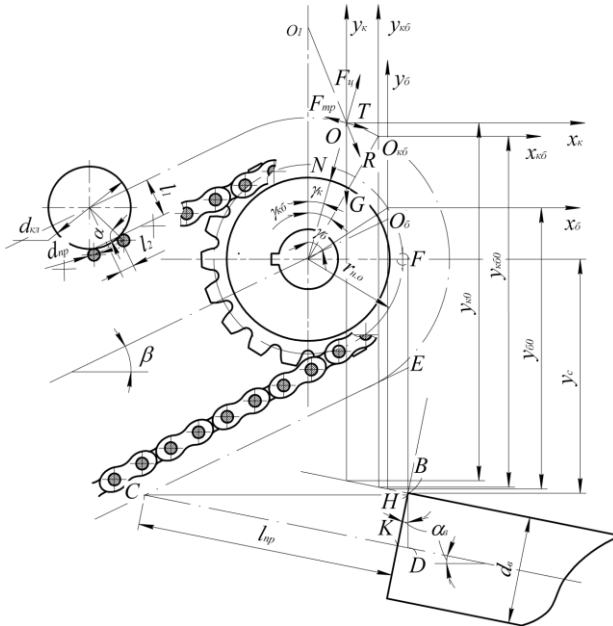


Рисунок 84 – Схема к определению основных параметров валцов

Второй этап соответствует полету компонентов вороха до контакта их с вальцами в точках  $A_k$ ,  $A_b$  и  $A_{kb}$  ( $A_{kb}$  соответствует контакту клубня, связанного с листостебельной массой, с вальцами). На третьем этапе происходит удар компонентов вороха о вальцы и далее – их отскок в точках  $A_k$  и  $A_{kb}$ .

Для определения длины вальцов, наклоненных под углом  $\alpha_0$  к горизонту, выполним теоретический анализ основных этапов прохождения ворохом технологической зоны. При этом рассмотрим задачу выноса различных компонентов картофельного вороха прутковым полотном элеватора и свободного их полета с учетом сопротивления воздуха до контакта с рабочей поверхностью вальцов.

Траектория движения компонентов вороха зависит от:

- коэффициентов трения компонентов по материалу рабочей поверхности пруткового элеватора  $f_k$ ,  $f_b$  и  $f_{kb}$ ;
- скорости подачи вороха на вальцы  $v_n$ ;
- аэродинамических свойств различных частиц вороха.

Первые два фактора ложатся в основу расчета координат точек отрыва компонентов вороха от прутковой поверхности элеватора.

## Теоретические исследования

Сбрасывание компонентов вороха с поверхности пруткового сепаратора производится в зоне направляющих звездочек, где ворох получает вращательное движение и с этого момента находится под действием силы тяжести  $G = m \cdot g$  и центробежной силы  $F_{ц}$ . Эти две силы приводятся к равнодействующей силе  $R$ , которая может быть разложена на тангенциальную составляющую  $T$  и нормальную  $N$ . Сила  $T$  стремится отделить компонент вороха от барабана, а сила  $N$  прижимает его к барабану. При движении пруткового элеватора и компонентов вороха в зоне контакта с барабаном равнодействующая  $R$  сил  $G$  и  $F_{ц}$  изменяется и по величине, и по направлению, но линия ее действия всегда проходит, при данной скорости движения, через одну и ту же точку  $O_1$ , называемую полюсом и расположенную на вертикали, проходящей через ось барабана на расстоянии  $l_n$  от оси вращения, причем

$$\frac{l_n}{r_{np}} = \frac{G}{F_{ц}} = \frac{m \cdot g}{m \cdot \omega^2 \cdot r_{np}},$$

откуда

$$l_n = \frac{g \cdot r^2}{v^2} = \frac{895}{n^2},$$

т. е. полюсное расстояние  $l_n$  зависит от числа оборотов барабана и увеличивается с их уменьшением.

Компоненты картофельного вороха, продолжая двигаться вместе с прутками, входят в первую четверть окружности звездочки. При этом движении составляющая  $N$  равнодействующей сил  $R$ , прижимая частицу вороха к пруткам, постепенно уменьшается, касательная же  $T$  увеличивается и, наконец, при положении частицы в точке  $O$  наступает равенство силы трения  $F_{тр}$  и касательной силы  $T$ . В следующий  $T$  момент станет больше удерживающей частицу силы  $F_{тр}$ , она отделится от поверхности сепаратора и начнет свободное падение в пространстве.

Момент отрыва компонента вороха определяется углом поворота барабана  $\gamma_k$ , при котором нарушается условие равновесия вороха на двух смежных прутках [1, с. 18; 2, с. 241]:

$$T \cdot l_1 \geq G \cdot l_2, \quad (1)$$

где  $l_1$  – расстояние от точки приложения силы  $T$  (центра клубня) до точки контакта прутка с клубнем,  $m$ ;

$l_2$  – расстояние от точки приложения силы тяжести  $G$  до точки контакта прутка с клубнем,  $m$ .

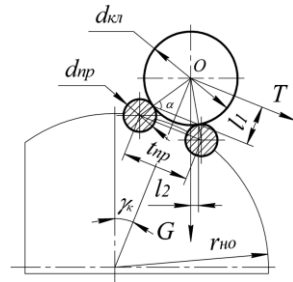


Рисунок 85 – Схема к определению угла отрыва клубня  $\gamma_k$

Согласно рисунку (85), расстояния  $l_1$  и  $l_2$  определяются по следующим выражениям:

$$l_1 = r_{кл} \cdot \sin \alpha;$$

$$l_2 = (r_{кл} \cdot \cos \alpha - r_{кл} \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \gamma_{\kappa}) \cdot \cos \gamma_{\kappa}; \quad (2)$$

$$\alpha = \arccos \frac{t_{np}}{2(r_{кл} + r_{np})},$$

где  $r_{кл} = 0,5 \cdot d_{кл}$  – радиус клубня,  $m$ ;

$t_{np}$  – шаг прутков,  $m$ ;

$r_{np} = 0,5 \cdot d_{np}$  – радиус прутка,  $m$ .

На практике принимается  $t_{np} = 0,041$   $m$  и  $r_{np} = 0,005$   $m$  [3, с. 210; 4, с. 197].

Для угла  $\gamma_{\kappa} = 0^\circ$  выражение (2) примет вид:

$$l_2 = r_{кл} \cdot \cos \alpha.$$

Согласно сказанному ранее, в момент отрыва

$$T = F_{np} = (N - F_y) \cdot f_{\kappa}.$$

С учетом того, что  $N = G \cdot \cos \gamma_{\kappa}$ ,

$$F_y = m_{\kappa} \cdot \omega^2 \cdot r' = \frac{m_{\kappa} \cdot v^2}{r'}, \quad (3)$$

где  $r' = r_{ю} + (r_{np} + r_{кл}) \cdot \sin \alpha$  – расстояние от центра клубня до оси приводной звездочки,  $m$ ;

$r_{ю} = t_{np} / \sin \frac{180}{z}$  – радиус начальной окружности звездочки,  $m$ ;

$z$  – количество зубьев звездочки, *шт.* Для пластинчатых цепей

Г.В. Корнеев рекомендует принимать  $z = 12 \div 24$ , для крючковых –  $z = 6 \div 8$  [5, с. 92].

Величина  $r_{кл}$ , входящая в выражение (3), принимается равной нулю при определении точки отрыва ботвы.

После подстановки значений  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $T$  и  $G$  в неравенство (3) последнее примет вид:

$$(f_{\kappa} - \operatorname{ctg} \alpha) \cdot \cos \gamma_{\kappa} + \sin \gamma_{\kappa} = \frac{f_{\kappa} \cdot v^2}{g \cdot r'}. \quad (4)$$

Приняв  $f_{\kappa} - \operatorname{ctg} \alpha = a$ , а  $\frac{f_{\kappa} \cdot v^2}{g \cdot r'} = b$  и разделив обе части уравнения

(4) на  $\sqrt{a^2 + 1}$ , получим:

$$\frac{a}{\sqrt{a^2 + 1}} \cos \gamma_{\kappa} + \frac{1}{\sqrt{a^2 + 1}} \sin \gamma_{\kappa} = \frac{b}{\sqrt{a^2 + 1}}. \quad (5)$$

Так как сумма квадратов действительных чисел  $\frac{a}{\sqrt{a^2+1}}$  и  $\frac{1}{\sqrt{a^2+1}}$  равна единице, то одно из этих чисел можно рассматривать как косинус, а другое – как синус некоторого угла.

Иными словами, если

$$\left(\frac{a}{\sqrt{a^2+1}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{a^2+1}}\right)^2 = 1,$$

то существует угол  $\beta$ , такой, что

$$\cos \beta = \frac{a}{\sqrt{a^2+1}}; \quad (6)$$

$$\sin \beta = \frac{1}{\sqrt{a^2+1}}. \quad (7)$$

Подставив выражения (6) и (7) в (5), получим

$$\cos(\beta - \gamma_k) = \frac{b}{\sqrt{a^2+1}}.$$

Откуда угол  $\gamma_k$  определится как

$$\gamma_k = \arccos \frac{a}{\sqrt{a^2+1}} - \arccos \frac{b}{\sqrt{a^2+1}}.$$

Окончательно

$$\gamma_k = \arccos \frac{f_k - \text{ctg} \alpha}{\sqrt{(f_k - \text{ctg} \alpha)^2 + 1}} - \arccos \frac{f_k \cdot v^2}{g \cdot r' \cdot \sqrt{(f_k - \text{ctg} \alpha)^2 + 1}}. \quad (8)$$

На рисунке 86 представлены зависимости изменения угла отрыва клубней картофеля от их диаметра и поступательной скорости пруткового сепаратора, построенные по выражению (8).

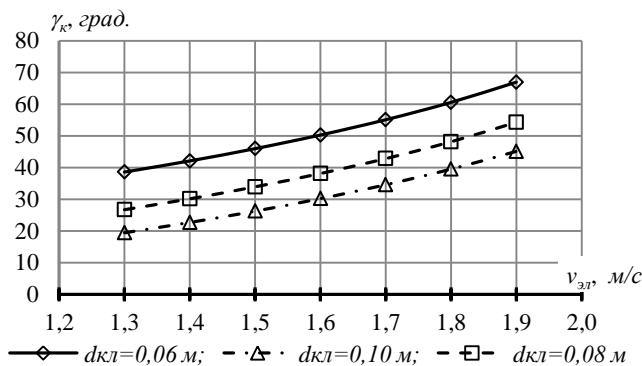


Рисунок 86 – Зависимость угла отрыва клубней картофеля от их диаметра и поступательной скорости пруткового сепаратора

При подстановке в выражение (8) конструктивных и кинематических параметров вальцов, принятых в предыдущих статьях авторов в данном сборнике, а также следующих исходных данных:

$t_{np}$	$r_{np}$	$r_{кл}$	$f_k$	$f_{\delta}$	$f_{к\delta}$	$l_{np}$	$\alpha_g$	$v_{эл}$
0,041	0,005	0,03	0,183	0,71	0,43	0,25	15	1,2

углы отрыва компонентов вороха составят: для клубней  $\gamma_k = 36^\circ$ , для ботвы  $\gamma_{\delta} = 51^\circ$  и клубней с ботвой  $\gamma_{к\delta} = 39^\circ$ .

### Определение рабочей длины вальцов

Общая длина вальцов, согласно рисунку (87), будет складываться:

$$L_g = \delta + S + \Delta l, \quad (9)$$

где  $\delta$  – зона рассеивания частиц компонентов вороха при падении, м;

$S$  – расстояние от точки падения свободного клубня до точки повторного его падения вместе с ботвой на вальцы после однократного отскока от вальцов, м;

$\Delta l$  – величина, учитывающая погрешности при падении частиц, вызываемые различными помехами (вибрация и перекосы мобильных машин, действие ветра и т. п.), а также время, необходимое на отрыв ботвы вальцами. Принимаем  $\Delta l = 0,15$  м [6, с. 141].

На рисунке 87 точка  $A_{к\delta 2}$  соответствует точке повторного падения клубня вместе с ботвой на вальцы после однократного отскока от вальцов.

Для определения общей длины вальцов необходимо определить координаты этих точек.

Расположив начало координат в точке  $O_k$ , составим систему дифференциальных уравнений движения клубня:

$$\begin{cases} \frac{m_k \cdot d^2 x_k}{dt^2} = 0; \\ \frac{m_k \cdot d^2 y_k}{dt^2} = -m_k g; \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \frac{d^2 x_k}{dt^2} = 0; \\ \frac{d^2 y_k}{dt^2} = -g. \end{cases} \quad (10)$$

Разделяя переменные и дважды интегрируя оба уравнения системы (10), учитывая, что при  $t = 0$  имеем  $v_x^0 = v_n \cdot \cos \gamma_k$  и  $v_y^0 = v_n \cdot \sin \gamma_k$ , получим следующие зависимости:

$$\begin{cases} x_k = v_n \cdot t \cdot \cos \gamma_k; \\ y_k = v_n \cdot t \cdot \sin \gamma_k - \frac{gt^2}{2}. \end{cases} \quad (11)$$

Выразив из первого уравнения системы (11)  $t = \frac{x_k}{v_n \cdot \cos \gamma_k}$  и подставив полученное значение времени во второе уравнение этой же

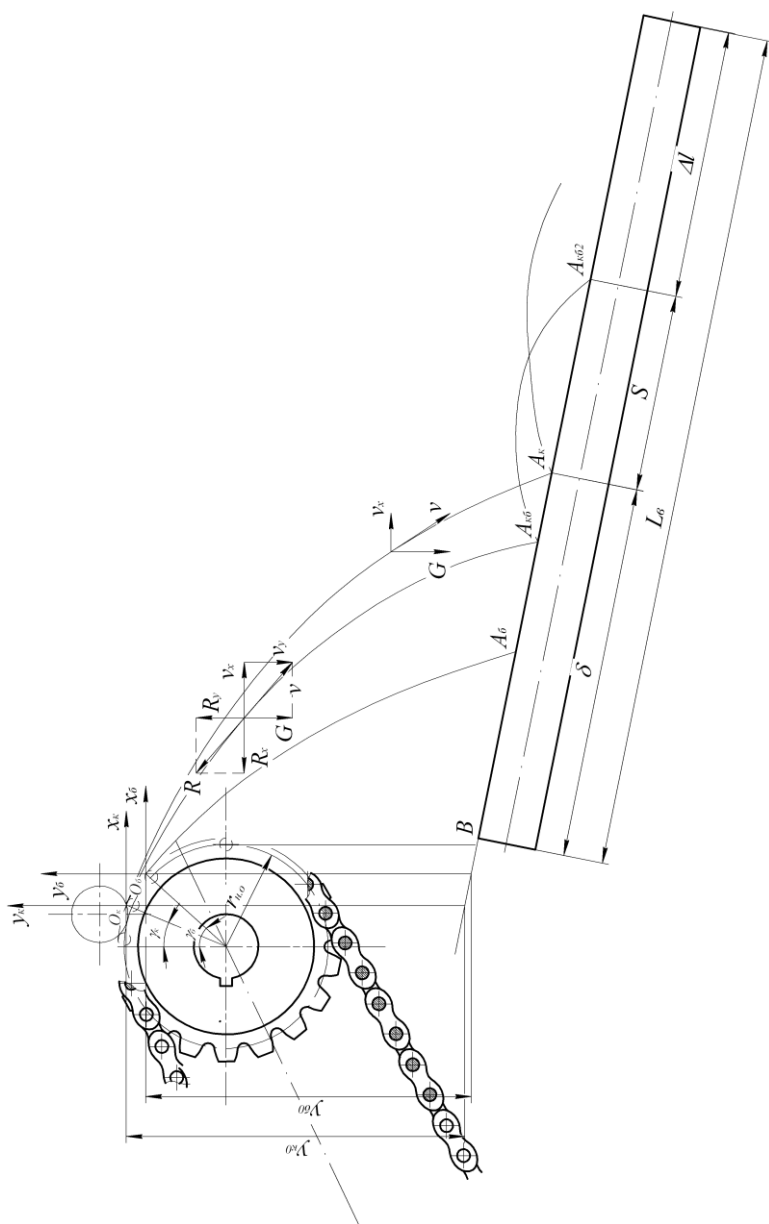


Рисунок 87 – Схема к обоснованию рабочей длины вала

системы, найдем уравнение траектории движения клубня без учета сопротивления воздуха:

$$y_{\kappa} = x_{\kappa} \cdot \operatorname{tg} \gamma_{\kappa} - \frac{g \cdot x_{\kappa}^2}{2 \cdot v_n^2 \cdot \cos^2 \gamma_{\kappa}}.$$

Для нахождения координаты точки пересечения траектории падения клубня с поверхностью вальцов  $A_{\kappa}$  (рисунок 87) решим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} y_{\kappa} = x_{\kappa} \cdot \operatorname{tg} \gamma_{\kappa} - \frac{g \cdot x_{\kappa}^2}{2 \cdot v_n^2 \cdot \cos^2 \gamma_{\kappa}}; \\ y_{\kappa} = -x_{\kappa} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{\epsilon} - y_{\kappa 0}. \end{cases} \quad (12)$$

Во втором уравнении данной системы неизвестной величиной является  $y_{\kappa 0}$ . Для ее определения будем руководствоваться следующими соображениями. Точка  $B$  (рисунок 87), определяющая начальную точку вальцов, должна лежать на вертикали, которая одновременно является касательной к поверхности прутка элеватора. Такое расположение верхнего основания вальцов позволяет гарантировать падение любой частицы в зону ботвоотделения, а длина отрезка  $BA$  и есть величина  $\delta$  (рисунок 87).

Расстояние  $y_c$  от верхней точки вальцов  $B$  до оси вращения барабана элеватора зависит от длины хвостовика вала вальца  $l_{np}$ , на котором размещены приводные элементы сепаратора. При этом хвостовик не должен касаться нижней ветви полотна пруткового элеватора. Величина  $y_c$ , численно равная длине отрезка  $BF$ , определяется как разность между длиной отрезков  $DF$  и  $DB$ :

$$y_c = DF - DB. \quad (13)$$

Длину отрезка  $DF$  определим как сумму отрезков:

$$DF = FE + EH + HD,$$

где  $FE = (r_{n.o} + 0,5 \cdot r_{np}) \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}$ ;  $HD = \left( l_{np} + \frac{d_{\epsilon}}{2} \sin \alpha_{\epsilon} \right) \cdot \sin \alpha_{\epsilon}$ .

$$EH = CH \cdot \operatorname{tg} \beta = \left( l_{np} + \frac{d_{\epsilon}}{2} \sin \alpha_{\epsilon} \right) \cdot \cos \alpha_{\epsilon} \cdot \operatorname{tg} \beta.$$

Откуда

$$\begin{aligned} DF = & (r_{n.o} + 0,5 \cdot r_{np}) \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} + \left( l_{np} + \frac{d_{\epsilon}}{2} \sin \alpha_{\epsilon} \right) \cdot \cos \alpha_{\epsilon} \cdot \operatorname{tg} \beta + \\ & + \left( l_{np} + \frac{d_{\epsilon}}{2} \sin \alpha_{\epsilon} \right) \cdot \sin \alpha_{\epsilon} = (r_{n.o} + 0,5 \cdot r_{np}) \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} + \\ & + \left( l_{np} + \frac{d_{\epsilon}}{2} \sin \alpha_{\epsilon} \right) \times (\cos \alpha_{\epsilon} \cdot \operatorname{tg} \beta + \sin \alpha_{\epsilon}). \end{aligned} \quad (14)$$

Согласно рисунку 84,



$$DB = \frac{d_\epsilon}{2 \cdot \cos \alpha_\epsilon}. \quad (15)$$

С учетом (14) и (15) выражение (13) примет вид:

$$y_c = (r_{н.о} + 0,5 \cdot r_{np}) \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} + \left( l_{np} + \frac{d_\epsilon}{2} \sin \alpha_\epsilon \right) \times (\cos \alpha_\epsilon \cdot \operatorname{tg} \beta + \sin \alpha_\epsilon) - \frac{d_\epsilon}{2 \cdot \cos \alpha_\epsilon}.$$

Величину  $y_{к0}$ , входящую во второе уравнение системы (12), определим по выражению:

$$y_{к0} = y_c + (r_{н.о} + (r_{np} + r_{кл}) \cdot \sin \alpha) \cdot \cos \gamma_\kappa - \\ - \left( (r_{н.о} + 0,5 \cdot r_{np}) - (r_{н.о} + (r_{np} + r_{кл}) \cdot \sin \alpha) \cdot \sin \gamma_\kappa \right) \cdot \operatorname{tg} \alpha_\epsilon.$$

Приравняв правые части уравнений системы (23), получим следующее уравнение:

$$\frac{g}{2 \cdot v_n^2 \cdot \cos^2 \gamma_\kappa} \cdot x_\kappa^2 - (\operatorname{tg} \gamma_\kappa + \operatorname{tg} \alpha_\epsilon) \cdot x_\kappa - y_{к0} = 0. \quad (16)$$

Положительный корень этого уравнения дает значение координаты  $x_\kappa$  точки  $A_\kappa$  в системе  $x_\kappa O_\kappa y_\kappa$  (рисунок 87).

Координата  $y_\kappa$  точки  $A_\kappa$  определится решением уравнения

$$y_\kappa = -x_\kappa \cdot \operatorname{tg} \alpha_\epsilon - y_{к0}$$

при подстановке в него значения  $x_\kappa$ , найденного по (16).

Для нахождения точки контакта свободной ботвы с вальцами (точка  $A_\delta$ ) необходимо рассмотреть движение компонентов вороха с учетом сопротивления воздуха. При этом принимаем силу сопротивления воздуха пропорциональной скорости.

Для системы  $x_\delta O_\delta y_\delta$  составим систему дифференциальных уравнений движения свободной ботвы:

$$\begin{cases} \frac{m_\delta \cdot d^2 x_\delta}{dt^2} = -k \frac{m_\delta \cdot dx_\delta}{dt}; \\ \frac{m_\delta \cdot d^2 y_\delta}{dt^2} = -m_\delta g - k \frac{m_\delta \cdot dy_\delta}{dt}, \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \frac{d^2 x_\delta}{dt^2} = -k \frac{dx_\delta}{dt}; \\ \frac{d^2 y_\delta}{dt^2} = -g - k \frac{dy_\delta}{dt}, \end{cases} \quad (17)$$

где  $k = \mu/m_\delta$ ;

$\mu$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий сопротивление воздуха (для небольших скоростей сопротивления скорости воздуха принимаем пропорциональными скорости).

Результаты экспериментальных исследований показывают, что для основных компонентов вороха (корнеплоды + ботва + почвенные примеси) в интервале скоростей частиц вороха  $0 \div 5$  м/с значение  $k$  находится в диапазоне  $0 \div 2,5$  с<sup>-1</sup> [6, с. 140]. Максимальное значение  $k = 2,5$  соответствует листьям ботвы, минимальное  $k = 0$  – корнеплодам.

Приняв  $\frac{dx_{\bar{\sigma}}}{dt} = v_x$ ;  $\frac{dy_{\bar{\sigma}}}{dt} = v_y$ , разделяя переменные, интегрируя и подставляя значения постоянных [5, с. 43], система (17) с учетом начальных условий примет вид:

$$\begin{cases} v_x = v_n \cdot e^{-kt} \cdot \cos \gamma_{\bar{\sigma}}; \\ v_y = \frac{1}{k} \left( (g + k \cdot v_n \cdot \sin \gamma_{\bar{\sigma}}) \cdot e^{-kt} - g \right). \end{cases} \quad (18)$$

Интегрируя второй раз, получим:

$$\begin{cases} x_{\bar{\sigma}} = \frac{v_n}{k} \cdot (1 - e^{-kt}) \cdot \cos \gamma_{\bar{\sigma}}; \\ y_{\bar{\sigma}} = \frac{1}{k^2} \cdot (g + k \cdot v_n \cdot \sin \gamma_{\bar{\sigma}}) \cdot (1 - e^{-kt}) - \frac{g}{k} \cdot t. \end{cases} \quad (19)$$

Для определения уравнения траектории точки в явной форме, надо исключить из уравнения движения время. Для этого первое уравнение системы (19) приведем к виду:

$$1 - e^{-kt} = \frac{x_{\bar{\sigma}} \cdot k}{v_n \cdot \cos \gamma_{\bar{\sigma}}}. \quad (20)$$

Логарифмируя обе части уравнения (36), получим:

$$t = \frac{1}{k} \cdot \ln \left( 1 - \frac{x_{\bar{\sigma}} \cdot k}{v_n \cdot \cos \gamma_{\bar{\sigma}}} \right). \quad (21)$$

Подставляя два последних выражения во второе уравнение системы (35), получаем искомое уравнение траектории:

$$y_{\bar{\sigma}} = \frac{1}{k} \cdot \frac{g + k \cdot v_n \cdot \sin \gamma_{\bar{\sigma}}}{v_n \cdot \cos \gamma_{\bar{\sigma}}} \cdot x_{\bar{\sigma}} + \frac{g}{k^2} \cdot \ln \left( 1 - \frac{x_{\bar{\sigma}} \cdot k}{v_n \cdot \cos \gamma_{\bar{\sigma}}} \right). \quad (22)$$

Данное уравнение является трансцендентным и решается графическим методом при подстановке в него фиксированных значений. Точка контакта листостебельной массы определится при совпадении значений координат  $x_{\bar{\sigma}}$  и  $y_{\bar{\sigma}}$  при решении уравнения (22) и уравнения, характеризующего прямую, которой принадлежит отрезок  $A_{\bar{\sigma}}A_{\kappa}$  в системе  $x_{\bar{\sigma}}O_{\bar{\sigma}}y_{\bar{\sigma}}$ .

$$y_{\bar{\sigma}} = -x_{\bar{\sigma}} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{\bar{\sigma}} - y_{\bar{\sigma}0}. \quad (23)$$

Значение  $y_{\bar{\sigma}0}$  определится

$$y_{\bar{\sigma}0} = y_c + (r_{н.о} + 0,5 \cdot r_{н.р}) \cdot \cos \gamma_{\bar{\sigma}} - ((r_{н.о} + 0,5 \cdot r_{н.р}) - (r_{н.о} + 0,5 \cdot r_{н.р}) \cdot \sin \gamma_{\kappa}) \cdot \operatorname{tg} \alpha_{\bar{\sigma}}.$$

Произведем плоскопараллельный перенос координаты  $A_{\bar{\sigma}}$  в систему  $x_{\kappa}O_{\kappa}y_{\kappa}$  по следующим выражениям [7, с. 58]:

$$\begin{aligned} \bar{x}_{\bar{\sigma}} &= x_{\bar{\sigma}} + (r_{н.о} + 0,5 \cdot r_{н.р}) \cdot \sin \gamma_{\bar{\sigma}} - (r_{н.о} - (r_{н.р} + r_{\kappa}) \cdot \sin \alpha) \cdot \sin \gamma; \\ \bar{y}_{\bar{\sigma}} &= y_{\bar{\sigma}} - [(r_{н.о} - (r_{н.р} + r_{\kappa}) \cdot \sin \alpha) \cdot \cos \gamma - (r_{н.о} + 0,5 \cdot r_{н.р}) \cdot \cos \gamma_{\bar{\sigma}}]. \end{aligned}$$

Найдем координаты точки  $B$  в системе  $x_{\kappa}O_{\kappa}y_{\kappa}$ :

$$x_B = (r_{н.о} + 0,5 \cdot r_{np}) - (r_{н.о} - (r_{np} + r_{кл}) \cdot \sin \alpha) \cdot \sin \gamma_k;$$

$$y_B = y_C - (r_{н.о} - (r_{np} + r_{кл}) \cdot \sin \alpha) \cdot \cos \gamma_k.$$

Для определения участка вальцов, на котором происходит отскок клубня с ботвой от ботвоотделяющей поверхности (вальцов) и его повторный контакт с вальцами, рассмотрим задачу свободного полета связанного с остатками ботвы клубня.

Дифференциальные уравнения движения клубней с неотделившейся ботвой описываются уравнениями, аналогичными (17)–(23).

Для нахождения координат точек падения в системе координат, центр которой лежит в точке отрыва клубней с ботвой от полотна пруткового элеватора (точка  $O_{кб}$ , рисунок 87), необходимо решить графическим способом:

$$\begin{cases} y_{кб} = \frac{1}{k} \cdot \frac{g + k \cdot v_n \cdot \sin \gamma_{кб}}{v_n \cdot \cos \gamma_{кб}} \cdot x_{кб} + \frac{g}{k^2} \cdot \ln \left( 1 - \frac{x_{кб} \cdot k}{v_n \cdot \cos \gamma_{кб}} \right); \\ y_{кб} = -x_{кб} \cdot \operatorname{tg} \alpha_s - y_{кб0}. \end{cases}$$

Произведя плоскопараллельный перенос координат точки  $A_{кб}$  из  $x_{кб}O_{кб}y_{кб}$  в  $x_kO_ky_k$  по формулам:

$$\begin{cases} \bar{x}_{кб} = x_{кб} + (r_{н.о} - (r_{np} + r_{кл}) \cdot \sin \alpha) \cdot (\sin \gamma_{кб} - \sin \gamma_k); \\ \bar{y}_{кб} = y_{кб} + r_{н.о} - (r_{н.о} - (r_{np} + r_{кл}) \cdot \sin \alpha) \cdot (\cos \gamma_k - \cos \gamma_{кб}), \end{cases}$$

определим значение координат точки контакта клубней (с ботвой) с вальцами в системе координат  $x_kO_ky_k$ .

Для определения зоны  $S$ , в которой происходит отскок клубня с ботвой от вальцов при его повторном контакте с ними, необходимо найти составляющие  $v_x$  и  $v_y$  в момент контакта с вальцами клубня, связанного столонами с ботвой. Для этого определяем время полета с учетом сопротивления воздуха:

$$t = \frac{1}{k} \cdot \ln \frac{v_n \cdot \cos \gamma_{кб}}{v_n \cdot \cos \gamma_{кб} - x_{кб} \cdot k}.$$

Подставив полученное значение в систему (18), получим значения  $v_x$  и  $v_y$ , которые позволяют определить скорость клубня в момент контакта с вальцами:

$$v_1 = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}.$$

### Удар клубня, связанного с ботвой, о вальцы

Рассмотрим косою удар клубня о поверхность вальцов. Направим ось  $\tau$  вдоль наклонной плоскости, а ось  $n$  к ней – перпендикулярно в точке падения клубня на наклонную плоскость  $A_{кб}$  (рисунок 88). Пусть в некоторый момент времени клубень, встречаясь с поверхностью вальцов, имеет скорость  $v_1$ , образующую с нормалью к поверхности стенки угол паде-

ния  $\alpha_1$ , по прошествии малого промежутка времени клубень отскакивает от валцов со скоростью  $v_2$ , причем угол отражения равен  $\alpha_2$ .

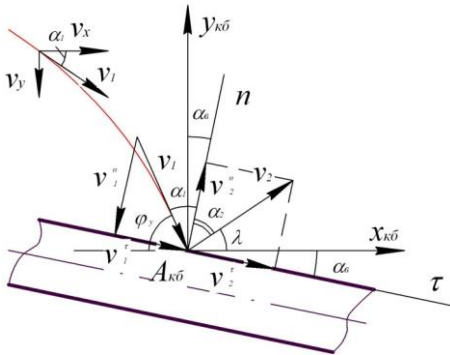


Рисунок 88 – Схема к определению скорости клубня после удара

Проведем нормальное сечение к поверхности валцов плоскостью, содержащей вектор скорости  $v_1$ , и отметим направление касательной  $\tau$  и нормали  $n$  к поверхности валцов в сечении. Пренебрегая импульсом силы трения между точкой и поверхностью валцов за время удара, будем иметь по теореме импульсов [8, с. 124] в проекции на касательную и нормаль:

$$\begin{cases} m_k \cdot v_2^\tau - m_k \cdot v_1^\tau = S^\tau = 0; \\ m_k \cdot v_2^n - m_k \cdot v_1^n = S^n, \end{cases} \quad (24)$$

где  $v_2^\tau, v_1^\tau, v_2^n, v_1^n$  – нормальные и тангенциальные составляющие скоростей до и после удара;

$S^\tau, S^n$  – ударный импульс.

Из первого уравнения системы (24) находим, что

$$v_1^\tau = v_2^\tau = v_1 \cdot \cos(90 - \alpha_1) = v_1 \cdot \sin \alpha_1,$$

где  $\alpha_1 = 90 - (\varphi_y - \alpha_6)$ ,  $\varphi_y = \arccos\left(\frac{v_x}{v_1}\right)$ .

Для определения  $v_2^n$  введем дополнительное допущение, высказанное для общего случая соударения двух тел Ньютоном: отношение абсолютных величин проекций относительной скорости тел после удара и до удара на направление общей нормали к поверхности тел в точке соприкосновения есть величина постоянная, не зависящая ни от относительной скорости, ни от размеров тел, а лишь от их материала.

Это отношение называется коэффициентом восстановления  $k_g$ . В рассматриваемом случае удара клубня о валцы будем иметь:

$$v_2^n = -k_g \cdot v_1^n = -k_g v_1 \cdot \cos \alpha_1.$$

Коэффициент восстановления  $k_g$  характеризует, насколько восстанавливается нормальная составляющая скорости после удара. Для реальных физических тел  $0 < k_g < 1$ .

Скорость клубня после удара определится как

$$v_2 = \sqrt{(v_2^r)^2 + (v_2^n)^2}.$$

Направление вектора скорости после удара определим по соотношению:

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{v_2^r}{v_2^n} = \frac{1}{k_g} \cdot \operatorname{ctg}(\varphi_y - \alpha_g).$$

Координаты точки повторного контакта клубня с вальцами найдем при рассмотрении радиального удара клубня, так как при этом взаимодействии клубень приобретает большую скорость, и полет его в начальный момент времени происходит под меньшим углом, что приводит к увеличению дальности полета.

Координаты точки повторного контакта  $A_{\kappa\bar{0}2}$  в системе  $x_{\kappa\bar{0}} y_{\kappa\bar{0}}$  (рисунок 88) определяются системой уравнений:

$$\begin{cases} y_{(A_{\kappa\bar{0}2})} = \frac{1}{k_g} \cdot \frac{g + k_g \cdot v_2 \cdot \sin \lambda}{v_2 \cdot \cos \lambda} \cdot x_{(A_{\kappa\bar{0}2})} + \frac{g}{k_g^2} \cdot \ln \left( 1 - \frac{k_g}{v_2 \cdot \cos \lambda} \cdot x_{(A_{\kappa\bar{0}2})} \right); \\ y_{(A_{\kappa\bar{0}2})} = -\operatorname{tg} \alpha_g \cdot x_{(A_{\kappa\bar{0}2})}, \end{cases} \quad (25)$$

где  $\lambda = 90 - (\alpha_2 - \alpha_g)$  – угол между вектором скорости после удара  $v_2$  и осью  $A_{\kappa\bar{0}} x_{\kappa\bar{0}}$ .

Первое уравнение системы (25) является уравнением траектории падения плода, а второе – уравнением прямой  $\tau$ .

Скорость клубня в момент времени

$$t = \frac{1}{k_g} \cdot \ln \left( \frac{v_2 \cdot \cos \lambda}{v_2 \cdot \cos \lambda - k_g \cdot x_{\kappa\bar{0}}} \right) \text{ при повторном ударе определится}$$

$$\begin{cases} v_{x_{\kappa\bar{0}2}} = v_2 \cdot e^{-k_g t} \cdot \cos \lambda; \\ v_{y_{\kappa\bar{0}2}} = \frac{1}{k_g} \left( (g + k_g \cdot v_2 \cdot \sin \lambda) \cdot e^{-k_g t} - g \right). \end{cases}$$

### Выводы

Проведенный теоретический анализ и полученные аналитические выражения координат точек  $B$ ,  $A_{\kappa}$ ,  $A_{\bar{0}}$ ,  $A_{\kappa\bar{0}}$  и  $A_{\kappa\bar{0}2}$ , приведенных к единой системе координат  $xOy$ , позволяют нам найти общую длину вальцов  $L_g$ .

С учетом исходных данных, представленных в предыдущих наших статьях настоящего сборника, длина вальцов  $L_g$ , найденная по выражению (19), равна 0,842 м ( $\delta = 0,286$  м,  $S = 0,406$  м и  $\Delta l = 1,5$  м).

Значение величин, использованных при промежуточных расчетах:  $y_{\kappa\bar{0}} = 0,290$  м;  $y_{\bar{0}0} = 0,250$  м;  $k_g = 0,9$ ;  $\alpha_1 = 45^\circ$ ;  $\alpha_2 = 49^\circ$ ;  $\varphi_y = 59^\circ$ ;  $\lambda = 26^\circ$ ;  $v_1 = 1,76$  м и  $v_2 = 1,67$  м.

05.06.2014

## Литература

1. Постников, Н.М. Картофелепосадочные машины / Н.М. Постников, З.С. Торбеев. – М.: Машиностроение, 1968. – С. 191.
2. Горячкин, В.П. Собрание сочинений в 3 томах / В.П. Горячкин. – М.: Колос, 1968. – Т. 1. – С. 720.
3. Мацепуро, М.Е. Технологические основы механизации уборки картофеля / М.Е. Мацепуро. – Минск, 1959. – С. 302.
4. Верещагин, Н.И. Рабочие органы машин для возделывания, уборки и сортирования картофеля / Н.И. Верещагин. – М.: Машиностроение, 1965. – 267 с.
5. Корнеев, Г.В. Транспортёры и элеваторы сельскохозяйственного назначения / Г.В. Корнеев. – Машгиз, 1961. – С. 231.
6. Диденко, Н.Ф. Машины для уборки овощей / Н.Ф. Диденко, В.А. Хвостов, В.П. Медведев. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1984. – 320 с.
7. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – С. 831.
8. Лойцянский, Л.Г. Курс теоретической механики / Л.Г. Лойцянский, А.И. Лурье. – Москва, 1954. – Т. 2. – С. 595.

УДК 631.356:635.132(476)

**А.Л. Рапинчук, В.Ф. Марышев,  
И.А. Барановский**  
(РУП «НПЦ НАН Беларуси по  
механизации сельского хозяйства»,  
г. Минск, Республика Беларусь)

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРОЦЕССА УБОРКИ КОРНЕПЛОДОВ ПОДКАПЫВАЮЩИМИ ОРГАНАМИ ВИБРАЦИОННОГО ДЕЙСТВИЯ**

### **Введение**

Подкапывающие органы выполняют одну из первых операций технологического процесса уборки корнеплодов, поэтому степень их совершенства в значительной мере определяет параметры и энергоёмкость последующих рабочих органов и в конечном счете – технологическую схему и качество работы машины. Чем меньше земли сходит с подкапывающих органов вместе с корнеплодами и чем интенсивнее разрушены связи между отдельными агрегатами почвенного пласта, тем легче очистить корнеплоды от почвы.

### **Основная часть**

Из существующих в настоящее время технологических принципов нарушения связи корнеплодов с почвой наибольшее распространение и признание получил принцип, при котором рабочие органы производят подкапывание пласта земли вместе с корнеплодом с одновременным его подъемом, в результате чего происходят сдвиги почвы в зонах связи корнеплодов с почвой, чем и достигается нарушение этой связи.