УДК 656.13

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВТОРИЧНОЙ СЕПАРАЦИИ В КАРТОФЕЛЕУБОРОЧНЫХ МАШИНАХ

Рембалович Георгий Константинович
к.т.н., доцент

Безносюк Роман Владимирович
инженер
Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, Рязань, Россия

В статье рассмотрены теоретические основы исследования рабочих органов на основе моделирования процесса вторичной сепарации в картофелеуборочных машинах

Ключевые слова: КАРТОФЕЛЬ, КЛУБЕНЬ, КАРТОФЕЛЕУБОРОЧНЫЙ КОМБАЙН

UDC 656.13

THE THEORETICAL BASE OF THE RESEARCH WORK ON THE BASIS OF MODELING OF SECONDARY SEPARATION IN A POTATO HARVESTER

Rembalovich Georgiy Konstantinovich
Cand.Tech.Sci., associate professor

Beznosuk Roman Vladimirovich
engineer
Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, Ryazan, Russia

The article deals with the theoretical base of the research work on the basis of modeling of secondary separation in a potato harvester

Keywords: POTATO, TUBER, POTATO HARVESTER

По данным многочисленных исследований [1, 2, 3, 4], на современном этапе развития техники для уборки картофеля одной из актуальных научно-технических задач является совершенствование процесса и средств вторичной сепарации картофелеуборочных машин. Известно достаточно большое количество схемно-конструктивных решений органов выносной сепарации, в том числе разработанных с участием авторов данной статьи. Данные решения позволяют снизить повреждения и потери клубней в уборочной машине, а также повысит эффективность разделения примесей в первую очередь за счет использования клубнеотражателей с эластичными рабочими элементами, контактирующими с клубнями, а также за счет изменения углов их взаимного действия [5, 6, 7, 8]. Для рационализации выбора параметров и регулировок рабочих элементов современных сепарирующих органов нами предлагается описанная ниже методика, основанная на моделировании процесса вторичной сепарации, позволяющая связать воедино основные конструктивные и кинематические параметры данных устройств.

Основным критическим фактором примем максимально допустимое значение напряжения, возникающее при взаимодействии клубня с боковой поверхностью эластичного рабочего элемента. Будем считать, что пока это значение не превышено, повреждения клубней не поднимутся выше уровня, установленного агротехническими требованиями.

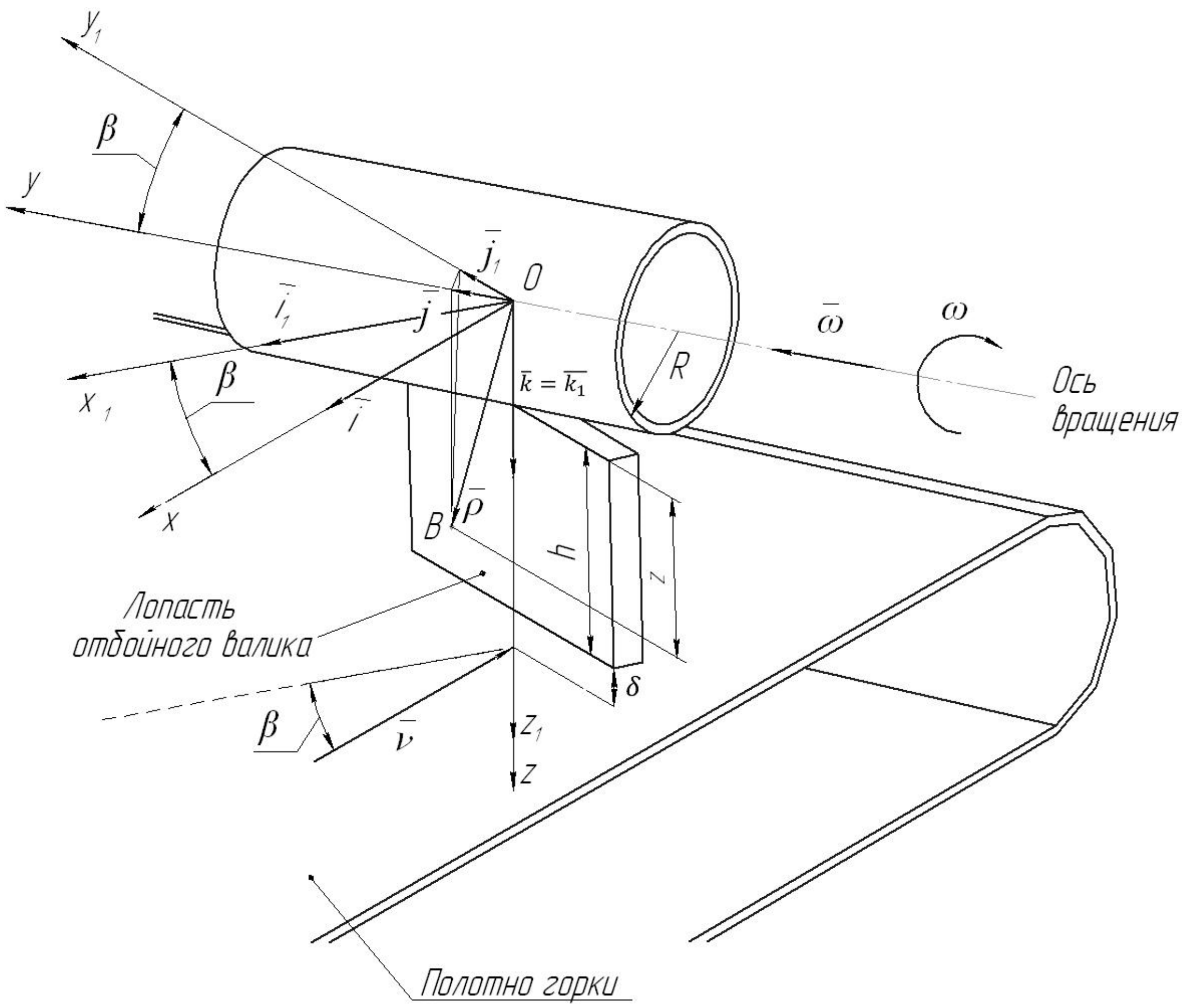
При расчете примем следующие допущения. Будем считать: клубни движутся сплошным равномерно распределенным по ширине полотна горки потоком; масса клубней, приходящихся на одну лопасть клубнеотражателя, соизмерима с массой лопасти. Поэтому при их взаимодействии будем учитывать массу клубней и массу лопасти.

Рассмотрим наиболее неблагоприятный случай взаимодействия. Наибольшая ударная нагрузка между клубнями и лопастью будет в положении, когда лопасть перпендикулярна плоскости полотна горки, т.к. в этом положении скорость клубня по отношению к лопасти достигает максимального значения.

Рассмотрим кинематику движения клубня и лопасти до удара лопасти о клубень (рисунок 1).

Рассмотрим наиболее неблагоприятный случай, при котором клубень с прикрепленным к ней столоном и неоторванной ботвой движется поступательно со скоростью $\bar{u}$ вместе с полотном горки. Будем считать, что ботва жестко связана с полотном горки и беспрепятственно проходит под лопастью отбойного валика.

Пластина, жестко закрепленная на валу, отстоит от оси вращения вала на расстоянии R и составляет с ней угол β. Отбойный валик расположен горизонтально и его ось параллельна полотну горки. Следовательно, нижняя кромка лопасти будет параллельна плоскости полотна горки в положении, когда лопасть перпендикулярна полотну горки. Таким образом, зазор b между полотном горки и лопастью одинаков по всей ширине лопасти.



β – угол между лопастью и осью отбойного валика, рад; $ox_1y_1z_1$ – система координат, связанная с лопастью; ось ох перпендикулярна оси вала, ось ox_1 перпендикулярна плоскости лопасти отбойного валика; R – расстояние от оси отбойного валика до верхнего края лопасти, м; z – расстояние от верхнего края лопасти до произвольной точки B лежащей в её плоскости, м; δ – рабочий зазор, м.

Рисунок 1. Схема взаимодействия лопасти и клубня.

Найдем скорость произвольной точки B лопасти при вращении лопасти с угловой скоростью ω вокруг оси отбойного валика.

Радиус-вектор точки B:

$$\overline{r_B} = -y_1 \cdot \sin b \cdot \bar{i} + y_1 \cdot \cos b \cdot \bar{j} + (R+z) \cdot \bar{k} \quad (1)$$

Вектор угловой скорости лопасти:

$$\overline{w} = -w \cdot \bar{j}, \quad (2)$$

где: $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ – единичные орты осей ox, oy, oz соответственно.

Тогда вектор скорости точки В равен:

$$\overline{u_B} = \overline{w} \times \overline{r_B} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ 0 & w & 0 \\ -y_1 \cdot \sin b & y_1 \cdot \cos b & (R+z) \end{vmatrix} =$$

$$= w \cdot (R+z) \cdot \bar{i} + w \cdot y_1 \cdot \sin b \cdot \bar{k} \qquad (3)$$

Проекции вектора скорости $\bar{u}$ на оси ox$_1$, oy$_1$, oz$_1$ равна скалярному произведению $\overline{u_B}$ на единичные орты этих скоростей:

$$u_{x1} = \overline{u_B} \cdot \bar{i}_1 = w \cdot (R+z) \cdot (\bar{i} \cdot \bar{i}_1) + w \cdot y_1 \cdot \sin b \cdot (\bar{k} \cdot \bar{j}_1)$$

Из рисунка 2 следует, что $(\bar{i} \cdot \bar{i}_1) = \cos b$, $(\bar{k} \cdot \bar{j}_1) = 0$. Окончательно имеем:

$$u_{x1} = (R+z) \cdot w \cdot \cos b \qquad (4)$$

$$u_{y1} = u$$

$$u_{y1} = \overline{u_B} \cdot \bar{j}_1 = (R+z) \cdot w \cdot \cos b \cdot (\bar{i} \cdot \bar{j}_1) + w \cdot y_1 \cdot \sin b \cdot (\bar{k} \cdot \bar{j}_1)$$

Из рисунка 1 следует, что $(\bar{i} \cdot \bar{j}_1) = -\sin b$; $(\bar{k} \cdot \bar{j}_1) = 0$. В результате имеем:

$$u_{y1} = -(R+z) \cdot w \cdot \sin b\ , \qquad (5)$$

$$u_{z1} = \overline{u_B} \cdot \bar{k}_1 = w \cdot (R+z) \cdot (\bar{i} \cdot \bar{k}_1) + w \cdot y_1 \cdot \sin b \cdot (\bar{k} \cdot \bar{k}_1)$$

Так как $(\bar{i} \cdot \bar{k}_1) = 0$, $(\bar{k} \cdot \bar{k}_1) = 0$, то будем считать, что перемещение при изгибе пластины малы по сравнению с высотой лопасти h.

$$u_{z1} = w \cdot y_1 \cdot \sin b\ , \qquad (6)$$

Так как лопасть испытывает косой удар по нижней кромке, то изгиб можно представить происходящим в двух плоскостях ox$_1$z и oy$_1$z (рисунок 2).

Уравнение изогнутой оси лопасти в плоскости ox$_1$z можно получить, используя уравнение начальных параметров:

$$x_1(z) = \frac{-f_x}{2 \cdot h^3} \cdot (3 \cdot h \cdot z^2 - z^3) \qquad (7)$$

где: f_x - максимальный прогиб в направлении оси ох$_1$, м

Уравнение изогнутой оси лопасти в направлении оси оу$_1$ имеет аналогичный вид:

$$y_1(z) = \frac{-f_y}{2 \cdot h} \cdot (3 \cdot h \cdot z^2 - z^3) \tag{8}$$

где: f_y - максимальный прогиб в направлении оси оу$_1$, м

Здесь принято, что лопасть жестко прикреплена к валу отбойного валика.

Является общепринятым допущение о пропорциональности скоростей точек оси прогибов:

$$\frac{u(z)}{\dot{f}} = \frac{x_1(z)}{f}$$

Отсюда можно выразить скорость произвольного сечения лопасти при изгибе по направлению оси ох$_1$:

$$u_{x1}(z) = \frac{-\dot{f}_x}{f_x} \cdot x_1(z) = \frac{-f_x}{2 \cdot h^3} \cdot (3 \cdot h \cdot z^2 - z^3) \tag{9}$$

Аналогично имеем скорость произвольного сечения лопасти при изгибе по направлению оси оу$_1$:

$$u_{y1}(z) = \frac{f_y}{2 \cdot h^3} \cdot (3 \cdot h \cdot z^2 - z^3) \tag{10}$$

Знак «-» в (9) означает, что скорости точек лопасти при её изгибе направлены в отрицательную сторону оси х$_1$.

Ударное взаимодействие клубня с лопастью в 1-ой фазе удара будем считать абсолютно неупругим, т.е. после первой фазы удара, когда клубень получает часть энергии лопасти, он не отскакивает от лопасти, а вместе с ней продолжает движение.

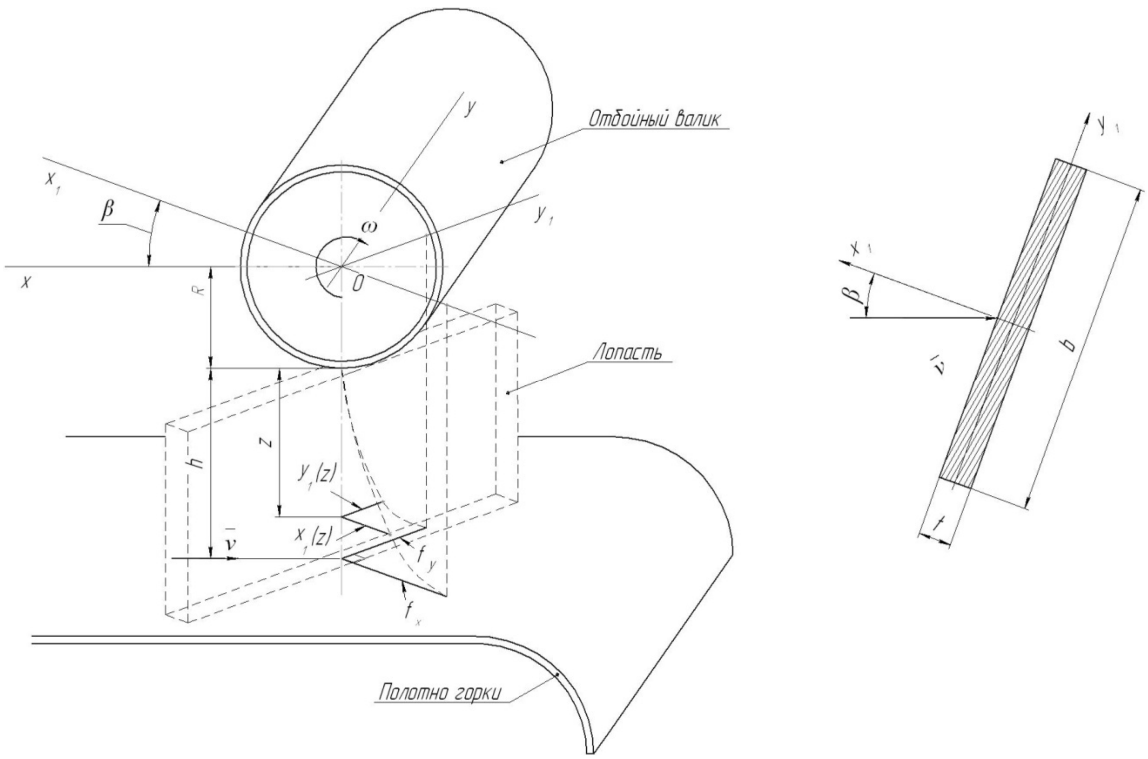
Согласно равенствам (5 – 10) скорость произвольной точки В лопасти в начале второй фазы удара будет равна:

$$u_{Bx1}^{(1)} = w \cdot (R + z) \cdot \cos b - \frac{\dot{f}_x}{2 \cdot h^3} \cdot (3 \cdot h \cdot z^2 - z^3)$$

$$u_{By1}^{(1)} = w \cdot (R + z) \cdot \sin b - \frac{\dot{f}_y}{2 \cdot h^3} \cdot (3 \cdot h \cdot z^2 - z^3) \qquad (11)$$

$$u_{Bz1}^{(1)} = -w \cdot y_1 \cdot \sin b$$

В равенстве неизвестными являются скорости точки в месте удара при изгибе лопасти $\dot{f}_x$ и $\dot{f}_y$.



z – текущая координата поперечного сечения лопасти; h – высота лопасти, м; $x_1(z)$ – перемещение точки оси лопасти с координатой z по направлению оси x_1, м; $y_1(z)$ перемещение точки оси лопасти с координатой z по направлению оси y_1, м; f_x, f_y - аналогичные перемещения в месте удара клубня о лопасть, м; оси ox_1, oy_1 – главные центральные оси инерции поперечного сечения; R – расстояние от оси вращения отбойного валика до лопасти; $\bar{\upsilon}$ - вектор скорости клубня; b – ширина лопасти, м; t – толщина лопасти, м.

Рисунок 2. Схема деформирования лопасти при косом изгибе.

Так как клубни в начале второй фазы удара движутся вместе с точками нижней кромки лопасти, то проекции скорости клубней равны:

$$u_{Bx1}^{(1)} = w \cdot (R + z) \cdot \cos b - \dot{f}_x$$

$$u_{By1}^{(1)} = w \cdot (R + z) \cdot \sin b - \dot{f}_y \qquad (12)$$

$$u_{Bz1}^{(1)} = -w \cdot y_1 \cdot \sin b$$

Скорости нижней точки оси лопасти $\dot{f}_x$ и $\dot{f}_y$ найдем, используя теорему Карно, согласно которой, потерянная кинетическая энергия системы клубень - лопасть за время первой фазы удара равна кинетической энергии потерянных скоростей клубня и лопасти.

Кинетическая энергия пластины до удара:

$$T_{п}^{0} = \frac{1}{2} \cdot \int_{0}^{h} \int_{-b/2}^{b/2} u_B^{2} dm, \qquad (13)$$

где: $dm = g \cdot tdzdy$ - масса элементарного объема лопасти толщиной t в точке B, кг;

γ – объемный вес материала лопасти, Н/м^3.

Квадрат скорости точки В лопасти равен:

$$u_B^{2} = u_{x1}^{2} + u_{y1}^{2} + u_{z1}^{2} \qquad (14)$$

Подставляем (14) в (13) и используя выражения (4), (5), (6) получим:

$$T_{п}^{0} = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t \cdot w^2 \cdot \int_{0}^{h} \int_{-b/2}^{b/2} \left[(R+z)^2 \cdot \cos^2 b + (R+z)^2 \cdot \sin^2 b + y_1^2 \cdot \sin^2 b \right] dzdy \qquad (15)$$

Вычисляя интегралы в (15) получим:

$$T_{п}^{0} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot w^2 \left[R \cdot (R+h) + \frac{h^2}{3} + \frac{b^2}{12} \cdot \sin^2 b \right], \qquad (16)$$

где: М – масса пластины, кг.

Кинетическая энергия клубней до удара:

$$T_k^{0} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot u^2, \qquad (17)$$

где: m – масса клубней по ширине лопасти, кг;

υ – скорость клубней, движущихся вместе с лентой элеватора, м/с.

Кинетическая энергия лопасти в конце первой фазы удара равна:

$$T_{\ddot{\imath}}^{(1)} = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t \cdot \int_0^h \int_{-b/2}^{b/2} (u_{Bx1}{}^2 + u_{By1}{}^2 + u_{Bz1}{}^2) dzdy \qquad (18)$$

Подставим в (18) равенство (11):

$$T_{\ddot{\imath}}^{(1)} = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t \cdot \int_0^h \int_{-b/2}^{b/2} \left\{ \left[w \cdot (R+z) \cdot \cos b - \frac{\dot{f}_x}{2 \cdot h^3} \cdot (3 \cdot h \cdot z^2) \right]^2 + \right.$$

$$\left. + \left[-w \cdot (R+z) \cdot \sin b + \frac{\dot{f}_x}{2 \cdot h^3} \cdot (3 \cdot h \cdot z^2 - z^3) \right]^2 + w^2 \cdot y_1{}^2 \cdot \sin^2 b \right\} dydz$$

Выполняя интегрирование, получим:

$$T_{\ddot{\imath}}^{(1)} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot \left\{ w^2 \cdot \left[R \cdot (R+h) + \frac{h^2}{3} \right] - 2 \cdot w \cdot (\dot{f}_x \cdot \cos b + \dot{f}_y \cdot \sin b) \cdot \right.$$

$$\left. \cdot \left(\frac{3}{8} \cdot R + \frac{11}{40} \cdot h \right) + \frac{33}{140} \cdot (\dot{f}_x{}^2 + \dot{f}_y{}^2) + w^2 \cdot \frac{b^2}{12} \cdot \sin^2 b \right\} \qquad (19)$$

Кинетическая энергия клубней в конце первой фазы удара равна:

$$T_k^{(1)} = \frac{m}{2} \cdot \left[\left(u_{x1}{}^{(1)} \right)^2 + \left(u_{y1}{}^{(1)} \right)^2 + \left(u_{z1}{}^{(1)} \right)^2 \right]$$

Подставим сюда равенство (12) и вычислим интеграл:

$$T_k^{(1)} = \frac{m}{2} \cdot \left\{ \left[w \cdot (R+h) \cdot \cos b - \dot{f}_x \right]^2 + \left[-w \cdot (R+h) \cdot \sin b + \dot{f}_y \right]^2 + \frac{b^2}{12} \cdot w^2 \cdot \sin^2 b) \right\}$$

(20)

Потерянные скорости клубней и лопасти за время первой фазы удара - это разность между их скоростями до удара и их скоростями в конце первой фазы удара. Потерянные скорости клубней и лопасти найдем, используя равенства (5, 10, 11). Так, для лопасти имеем:

$$u_{Bx1}{}^{*} = u_{Bx1} - u_{Bx1}{}^{(1)} = \frac{\dot{f}_x}{2 \cdot h^3} \cdot (3 \cdot h \cdot z^2 - z^3)$$

$$u_{By1}{}^{*} = u_{By1} - u_{By1}{}^{(1)} = -\frac{\dot{f}_y}{2 \cdot h^3} \cdot (3 \cdot h \cdot z^2 - z^3) \qquad (21)$$

$$u_{Bz1}{}^{*} = u_{Bz1} - u_{Bz1}{}^{(1)} = 0$$

для клубня:

$$u_{x1}{}^{*} = u_{x1}{}^{(0)} - u_{x1}{}^{(1)} = u \cdot \cos b - (w \cdot (R+h) \cdot \cos b - \dot{f}_x),$$

$$u_{y1}{}^{*} = u_{y1}{}^{(0)} - u_{y1}{}^{(1)} = u \cdot \sin b - (w \cdot (R+h) \cdot \sin b + \dot{f}_y), \qquad (22)$$

$$u_{z1}{}^{*} = u_{z1}{}^{(0)} - u_{z1}{}^{(1)} = 0 + w \cdot y_1 \cdot \sin b = w \cdot y_1 \cdot \sin b\ ,$$

где: $u_{x1}{}^{(0)}$, $u_{y1}{}^{(0)}$, $u_{z1}{}^{(0)}$ - проекции скорости клубней, движущихся вместе с полотном горки.

Кинетическая энергия потерянных скоростей лопасти равна:

$$T_{ï}{}^{*} = \frac{1}{2} \cdot g \cdot b \cdot t \cdot \int_0^h \left[\left(u_{Bx1}{}^{*}\right)^2 + \left(u_{By1}{}^{*}\right)^2 + \left(u_{Bz1}{}^{*}\right)^2 \right] dz$$

Подставим сюда равенства (21) и выполнив интегрирование, получим:

$$T_{ï}{}^{*} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot \frac{33}{140} \cdot (\dot{f}_x{}^2 + \dot{f}_y{}^2) \qquad (23)$$

Кинетическая энергия потерянных скоростей клубня:

$$T_k{}^{*} = \frac{m}{2} \cdot \left[\left(u_{Bx1}{}^{*}\right)^2 + \left(u_{By1}{}^{*}\right)^2 + \left(u_{Bz1}{}^{*}\right)^2 \right]$$

Подставим сюда равенство (22) и выполним интегрирование:

$$T_k{}^{*} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot u^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot [2 \cdot u \cdot \cos b \cdot \left(w \cdot (R+h) \cdot \cos b - \dot{f}_x\right) +$$

$$+ \left(w \cdot (R+h) \cdot \cos b - \dot{f}_x\right)^2 - 2 \cdot u \cdot \sin b \cdot \left(-w \cdot (R+h) \cdot \sin b + \dot{f}_y\right) +$$

$$+ \left(-w \cdot (R+h) \cdot \sin b - \dot{f}_y\right)^2 + w^2 \cdot \frac{b^2}{12} \cdot \sin^2 b\,] \qquad (24)$$

Согласно теореме Карно при неупругом ударе потерянная кинетическая энергия системы равна кинетической энергии потерянных скоростей:

$$T^{(0)} - T^{(1)} = T*, \qquad (25)$$

где: $T^{(0)} = T_{ï}{}^{(0)} + T_k{}^{(0)}$ – кинетическая энергия системы до удара;

$T^{(1)} = T_{ï}{}^{(1)} + T_k{}^{(1)}$ - кинетическая энергия системы в конце первой фазы удара;

$T^{*} = T_{ï}^{*} + T_{k}^{*}$ - кинетическая энергия потерянных скоростей клубнями и лопастью.

С учетом этого уравнение (25) перепишем в виде:

$$\left(T_{ï}^{(0)} - T_{ï}^{(1)}\right) + \left(T_{k}^{(0)} - T_{k}^{(1)}\right) = T^{*} \tag{26}$$

Вычислим разности в (26) и приведем их виду удобному для анализа полученного уравнения. Вычтем из равенства (16) равенство (19):

$$T_{ï}^{(0)} - T_{ï}^{(1)} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot \left[2 \cdot w \cdot \left(\dot{f}_x \cdot \cos b + \dot{f}_y \cdot \sin b\right) \cdot \left(\frac{3}{8} \cdot R + \frac{11}{40} \cdot h\right) - \right.$$

$$\left. - \frac{33}{140} \cdot \left(\dot{f}_x^{\,2} + \dot{f}_y^{\,2}\right)\right] \tag{27}$$

Вычтем из равенства (17) равенство (20):

$$T_{k}^{(0)} - T_{k}^{(1)} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot u^{2} - \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left\{\left[w \cdot (R + h) \cdot \cos b - \dot{f}_x\right]^{2} + \right.$$

$$\left. + \left[w \cdot (R + h) \cdot \sin b + \dot{f}_y\right]^{2} + \frac{b^{2}}{12} \cdot w^{2} \cdot \sin^{2} b\right\} \tag{28}$$

Подставим выражения (24), (27), (28) в равенство (26) и преобразуем полученное выражение к виду, удобному для анализа:

$$\frac{33}{140} \cdot M \cdot \left(\dot{f}_x^{\,2} + \dot{f}_y^{\,2}\right) + \frac{m}{2} \cdot (2 \cdot u \cdot \cos b + 2 \cdot w \cdot (R + h) \cdot \cos b - \dot{f}) \cdot$$

$$\cdot (w \cdot (R + h) \cdot \cos b - \dot{f}_x) + \frac{m}{2} \cdot (-2 \cdot u \cdot \sin b + 2 \cdot$$

$$\cdot (-w \cdot (R + h) \cdot \sin b + \dot{f}_y)) \cdot (w \cdot (R + h) \cdot \sin b + \dot{f}_y) +$$

$$+ m \cdot w^{2} \cdot \frac{b^{2}}{12} \cdot \sin^{2} b - M \cdot w \cdot (\dot{f}_x \cdot \cos b + \dot{f}_y \cdot \sin b) \cdot$$

$$\cdot \left(\frac{3}{8} \cdot R + \frac{11}{40} \cdot h\right) = 0 \tag{29}$$

Сгруппируем величины, содержащие f_x и f_y по отдельности:

$$\left[\frac{33}{140} \cdot M \cdot \dot{f}_x^{\,2} + m \cdot \left(u \cdot \cos b + w \cdot (R + h) \cdot \cos b - \dot{f}_x\right) \cdot \right.$$

$$\cdot \left(w \cdot (R + h) - \dot{f}_x\right) \cdot \cos b - M \cdot w \cdot \dot{f}_x \cdot \cos b \cdot \left(\frac{3}{8} \cdot R + \frac{11}{40} \cdot h\right) +$$

$$+\frac{33}{140}\cdot M\cdot \dot{f}_y^{\,2}+m\cdot(-u\cdot\sin b+w\cdot(R+h)\cdot\sin b+\dot{f}_y^{\,2})\cdot$$

$$\cdot\left(-w\cdot(R+h)\cdot\sin b+\dot{f}_y\right)+m\cdot\frac{b^2}{12}\cdot w^2\cdot\sin^2 b-$$

$$-M\cdot w\cdot\left(\frac{3}{8}\cdot R+\frac{11}{40}\cdot h\right)\cdot\dot{f}_y\cdot\sin b=0 \qquad (30)$$

Выражения в квадратных скобках независимы друг от друга. Их сумма может равняться нулю, тогда и только тогда, когда каждые из этих выражений в квадратных скобках равны нулю. Таким образом, уравнение (29) равносильно двум уравнениям.

$$\frac{33}{140}\cdot M\cdot \dot{f}_y^{\,2}+m\cdot\left(\left(u+w\cdot(R+h)\right)\cdot\cos b+\dot{f}_x^{\,2}\right)\cdot\left(w\cdot(R+h)\cdot\cos b-\dot{f}_x\right)-$$

$$-M\cdot w\cdot\left(\frac{3}{8}\cdot R+\frac{11}{40}\cdot h\right)\cdot\dot{f}_x\cdot\cos b=0 \qquad (31)$$

$$\frac{33}{140}\cdot M\cdot \dot{f}_y^{\,2}+m\cdot\left(\left(-u-w\cdot(R+h)\right)\cdot\sin b+\dot{f}_y^{\,2}\right)\cdot\left(-w\cdot(R+h)\cdot\sin b+\dot{f}_y\right)-$$

$$-M\cdot w\cdot\left(\frac{3}{8}\cdot R+\frac{11}{40}\cdot h\right)\cdot\dot{f}_y\cdot\sin b+m\cdot\frac{b^2}{12}\cdot w^2\cdot\sin^2 b=0 \qquad (32)$$

Раскроем скобки в (31) и (32) и сгруппируем подобные члены. В результате получим квадратные уравнения относительно $\dot{f}_x$ и $\dot{f}_y$.

$$\left(m+\frac{33}{140}\cdot M\right)\cdot\dot{f}_x^{\,2}-\dot{f}_x\cdot\left[m\cdot\left(u+2w\cdot(R+h)\right)+M\cdot w\cdot\left(\frac{3}{8}\cdot R+\frac{11}{40}\cdot h\right)\right]\cdot\cos b+$$

$$+m\cdot\left(u+2w\cdot(R+h)\right)\cdot w\cdot\left(R+h\right)\cdot\cos^2 b=0 \qquad (33)$$

$$\left(m+\frac{33}{140}\cdot M\right)\cdot\dot{f}_y^{\,2}-\dot{f}_y\cdot\left[m\cdot\left(u+2w\cdot(R+h)\right)+M\cdot w\cdot\left(\frac{3}{8}\cdot R+\frac{11}{40}\cdot h\right)\right]\cdot\sin b+$$

$$+m\cdot\left[\left(u+2w\cdot(R+h)\right)\cdot w\cdot\left(R+h\right)+\frac{b^2}{12}\cdot w^2\right]\cdot\sin^2 b=0 \qquad (34)$$

Решение уравнений (33) и (34) имеет вид:

$$\dot{f}_{x1,2}=\frac{B\pm\sqrt{B^2-4\cdot A\cdot C}}{2\cdot A}\cdot\cos b\ , \qquad (35)$$

$$\dot{f}_{y1,2}=\frac{B\pm\sqrt{B^2-4\cdot A\cdot C_1}}{2\cdot A}\cdot\sin b\ , \qquad (36)$$

где: $A = m + \frac{33}{140} \cdot M$;

$$B = m \cdot (u + 2w \cdot (R + h)) + M \cdot w \cdot (\frac{3}{8} R + \frac{11}{40} h);$$

$$C = m \cdot (u + 2w \cdot (R + h)) \cdot w \cdot (R + h);$$

$$C_1 = m \cdot \left[(u + 2w \cdot (R + h)) \cdot w \cdot (R + h) + \frac{b^2}{12} \right]$$

Чтобы определить знак перед корнем (35) и (36) рассмотрим случай, когда массой М лопасти можно пренебречь.

В этом случае:

$$\dot{x}_{x1,2} = \frac{u + 2w \cdot (R + h) \pm u}{2} \cdot \cos b$$

Если взять знак «+», то:

$$\dot{x}_x = (u + w \cdot (R + h)) \cdot \cos b$$

Если взять знак «-», то:

$$\dot{x}_x = w \cdot (R + h) \cdot \cos b$$

В безынерционной лопасти начальная скорость массы m равна относительной скорости массы m и точки удара массы о лопасть. Т.е.:

$$(u + w \cdot (R + h)) \cdot \cos b$$

Следовательно, в решении (35) и (36) надо брать знак «+».

Вычислив $\dot{x}_x$ из (35) $\dot{x}_y$ из (36) можно определить кинетическую энергию системы вначале второй фазы удара по равенствам (19) и (20).

Во второй фазе удара происходит деформация лопасти и натяжение столонов связывающих ботву с клубнями. Схематически деформированные состояния оси лопасти и растительных остатков изображены на рисунке 3.

Вторая фаза удара продолжается малый промежуток времени t =(0,02-0,05) с, поэтому движение точки лопасти при ее повороте на угол

$\varphi=\omega\cdot\tau$ можно считать происходящим по касательной к окружности с точностью до:

$$\tan^2\varphi \approx \varphi^2$$

Перемещение столона вместе с полотном горки (предполагается что ботва жестко связана с полотном горки):

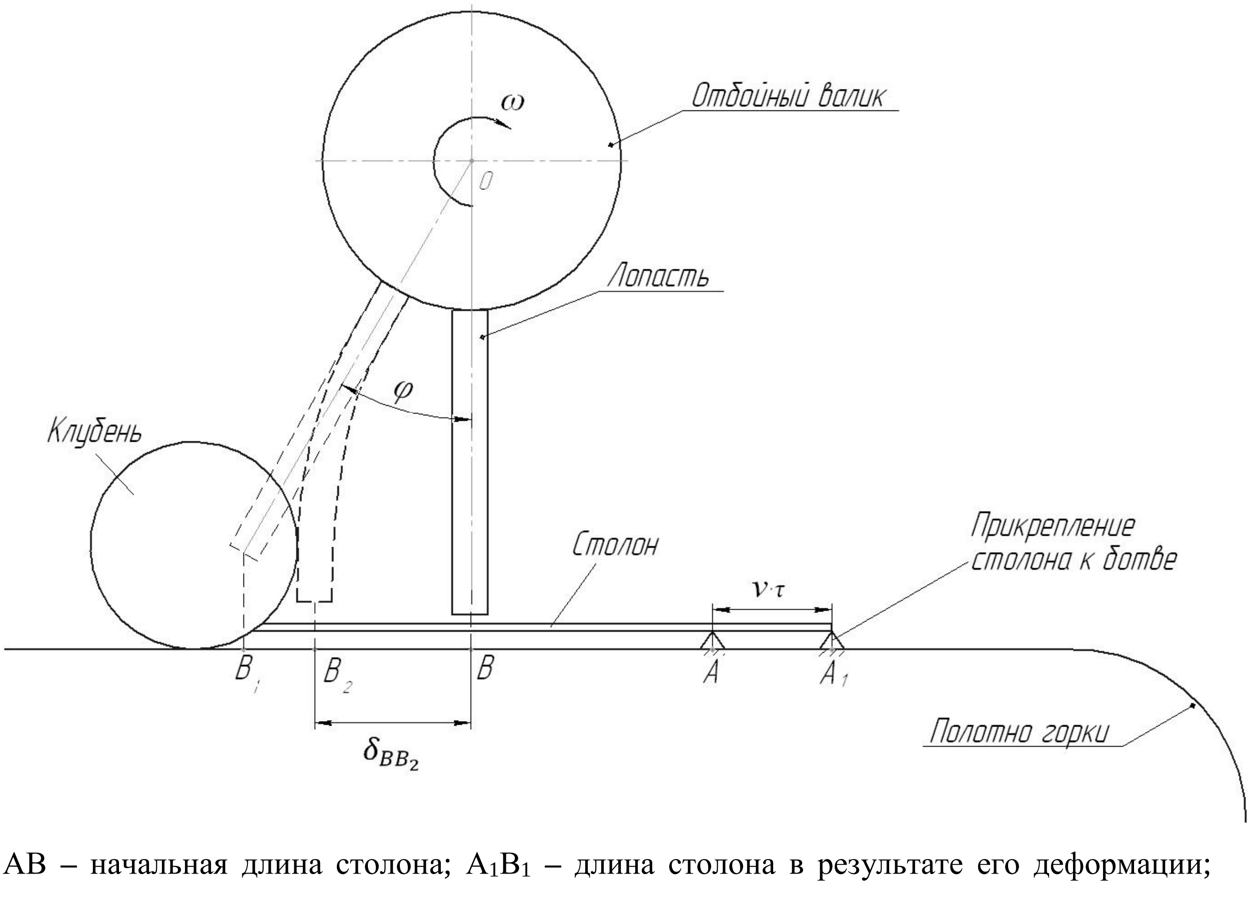
$$AA_1 = u \cdot t \tag{37}$$

Проекция полного прогиба на направление столона:

$$f = f_x \cdot \cos b + f_y \cdot \sin b \tag{38}$$

Перемещение точки B без учета деформации лопасти:

$$BB_1 = w \cdot (R+h) \cdot t \tag{39}$$



AB – начальная длина столона; A_1B_1 – длина столона в результате его деформации; B_1B_2 – полный прогиб лопасти в месте соударения с клубнем; ox_1y_1 – главные центральные оси инерции поперечного сечения лопасти; AA_1 - перемещение столон вместе с полотном горки (предполагается что ботва жестко связана с полотном горки); BB_1 - перемещение точки B без учета деформации лопасти.

Рисунок 3. Схема к определению удлинения корня клубня.

Поскольку жесткость лопасти в направлении оси x_1 существенно меньше жесткости в направлении оси y_1, то f_x существенно больше f_y и прогибы f_x и f_y.

малы по сравнению с длиной столона, то изменением направления столона за счет прогибов лопасти можно пренебречь. Тогда удлинение столона:

$$\Delta l = AA_1 + BB_2, \tag{40}$$

где: $BB_2 = BB_1 - f = d_{BB2}$

(41)

Подставляя (37), (38),(39), (41) в (40), получим:

$$\Delta l = u \cdot t + d_{BB2} = u \cdot t + w \cdot t \cdot (R + h) - f_x \cdot \cos b - f_y \cdot \sin b \tag{42}$$

Уравнение (42) является уравнением совместимости деформаций лопасти и столона.

Удлинение столона можно выразить через продольную силу N в столоне соотношением:

$$\Delta l = \frac{N}{C_k} \tag{43}$$

где: C_k - жесткость столона на растяжение, Н/м;

N – продольная сила в столоне, Н.

Прогибы лопасти можно выразить через усилия, с которыми клубни и столоны действуют на лопасть по известной из сопротивления материалов формуле для балки консоли.

Суммарные воздействия силы, с которой клубень действует на лопасть F_k и усилие, действующее со стороны клубня N, равно силе $F_п$:

$$F_ï = F_k + N \tag{44}$$

Проекции силы $F_п$ на оси x_1, y_1 равны:

$$F_{ïx} = F_ï \cdot \cos b\ , \ F_y = F_ï \cdot \sin b$$

Прогибы в месте удара равны:

$$f_{x1} = \frac{F_{ïx} \cdot h^3}{3 \cdot E_ï \cdot I_{y1}} = \frac{F_ï \cdot \cos b \cdot h^3}{3 \cdot E_ï \cdot I_{y1}},\ f_{y1} = \frac{F_{ïy} \cdot h^3}{3 \cdot E_ï \cdot I_{x1}} = \frac{F_ï \cdot \sin b \cdot h^3}{3 \cdot E_ï \cdot I_{x1}} \tag{45}$$

где: I_{x1}, I_{y1} - осевые моменты инерции поперечного сечения лопасти относительно осей x_1 и y_1 соответственно;

Еп – модуль упругости (модуль Юнга) материала лопасти.

Подставим (43) и (45) в уравнение совместности деформации (42):

$$\frac{N^2}{C_k}+\frac{F_п{}^2\cdot h^3}{3\cdot E_п}\cdot\left(\frac{\cos^2 b}{I_{y1}}+\frac{\sin^2 b}{I_{x1}}\right)=\left(u+w\cdot(R+h)\cdot t\right) \qquad (46)$$

Второе уравнение для определения N и $F_п$ получим используя теорему об изменении кинетической энергии в относительном движении во время второй фазы удара:

$$T-T_0=A^{(i)}+A^{(l)}+A_{пер}^{ин}\,, \qquad (47)$$

где: T, T_0 – кинетические энергии относительного движения в конце и в начале второй фазы удара;

$A^{(i)}$ - работа внутренних сил;

$A^{(l)}$ – работа внешних сил;

$A_{пер}^{ин}$ - работа сил инерции переносного движения.

В конце второй фазы удара прогиб достигает максимального значения, а скорость относительного движения равна нулю, следовательно:

$$T=0 \qquad (48)$$

В начале второй фазы удара прогиб достигает максимального значения, а скорости точек лопасти и клубней связанные со скоростями прогибов лопасти f_x и f_y определяются согласно равенствам (19) и (20):

$$T_0=\frac{1}{2}\cdot\left(m+\frac{33}{140}\cdot M\right)\cdot\left(\dot f_x{}^2+\dot f_y{}^2\right) \qquad (49)$$

Работа внутренних сил:

$$A^{(i)}=-U\,, \qquad (50)$$

где: U – потенциальная энергия деформации системы, т.е. лопасти и столонов.

Работа внешних сил $A^{(l)}$ (пренебрегая работой силы тяжести при ударе) равна нулю.

Работа сил инерции переносного движения $A_{пер}^{ин}$ при равномерном вращении плоскости также равна нулю, так как нормальная составляющая ускорения перпендикулярна перемещению точек лопасти и клубней.

В результате равенство (47) с учетом (48), (49), (50) принимает вид:

$$U_п + U_k = \frac{1}{2}\cdot\left(m + \frac{33}{140}\cdot M\right)\cdot\left(\dot{f}_x^{\,2} + \dot{f}_y^{\,2}\right) \tag{51}$$

где: $U_п$, $U_к$ – потенциальные энергии столонов и лопасти.

Потенциальная энергия деформации лопасти при косом изгибе равна:

$$U_п = \int_0^h \frac{M_x^{\,2}dz}{2\cdot I_x\cdot E_п} + \int_0^h \frac{M_y^{\,2}dz}{2\cdot I_y\cdot E_п} \tag{52}$$

где: M_x, M_y – изгибающие моменты в лопасти от силы $F_п$ в момент когда скорость движения лопасти от изгиба равна нулю, т.е. $\dot{f}_x^{\,2} = \dot{f}_y^{\,2} = 0$. В этот момент на лопасть будет действовать максимальная сила давления $F_п$.

Изгибающие моменты равны:

$$M_{x1}(z) = F_п\cdot\sin b\cdot z\,,\ M_{y1}(z) = F_п\cdot\cos b\cdot z\,, \tag{53}$$

где: z – координата сечения, отсчитываемая от низа лопасти.

Подставляем (53) в (52) и интегрируя, получим:

$$U_п = \int_0^h \frac{(F_п\cdot\sin b)^2 dz}{2\cdot I_x\cdot E_п} + \int_0^h \frac{(F_п\cdot\cos b\cdot)^2 dz}{2\cdot I_y\cdot E_п} =$$

$$= \frac{F_п\cdot h^3}{6\cdot E_п}\cdot\left[\frac{\sin^2 b}{I_x} + \frac{\cos^2 b}{I_y}\right] \tag{54}$$

Столон, связывающий клубень с ботвой, работает на растяжение. Поэтому в пределах упругих деформаций:

$$U_k = \frac{N^2}{2\cdot C_б} \tag{55}$$

Подставим (54), (55) в выражение (47). В результате получим второе уравнение относительно $F_п$ и N:

$$\frac{N^2}{C_б} + \frac{F_п^{\,2}\cdot h^3}{3\cdot E}\cdot\left(\frac{\cos^2 b}{I_{x1}} + \frac{\sin^2 b}{I_{y1}}\right) = \left(\dot{f}_x^{\,2} + \dot{f}_y^{\,2}\right)\cdot\left(m + \frac{33}{140}\cdot M\right) \tag{56}$$

Систему уравнений (46), (56) запишем в виде:

$$\begin{cases} aN + bF_{ï} = c \\ aN^2 + bF_{ï}^{\,2} = d \end{cases}, \qquad (57)$$

где: $a = \dfrac{1}{C_{á}}$; $b = \dfrac{h^3}{3 \cdot E} \cdot \left(\dfrac{\cos^2 b}{I_{x1}} + \dfrac{\sin^2 b}{I_{y1}} \right)$;

$\tilde{n} = \left(u + w \cdot (R+h)\right) \cdot t$; $d = \left(f_x^{\,2} + f_y^{\,2} \right) \cdot \left(m + \dfrac{33}{140} \cdot M \right)$

(58)

Решение системы уравнений (57) может быть получено методом подстановки:

$$F_{ï\,1,2} = \frac{2 \cdot c \cdot b \pm \sqrt{(2 \cdot c \cdot b)^2 - 4 \cdot (b^2 + a \cdot b) \cdot (c^2 - a \cdot d)}}{2 \cdot (b^2 + a \cdot b)} \qquad (59)$$

$$N = \frac{c - b \cdot \left(\dfrac{2 \cdot c \cdot b \pm \sqrt{(2 \cdot c \cdot b)^2 - 4 \cdot (b^2 + a \cdot b) \cdot (c^2 - a \cdot d)}}{2 \cdot (b^2 + a \cdot b)} \right)}{a} \qquad (60)$$

Сила взаимодействия клубней с лопастью:

$$F_k = F_{ï} - N = \frac{4 \cdot b^2 \cdot c \pm (a - b) \cdot \sqrt{a \cdot b \cdot \left(c^2 - b \cdot d - a \cdot d\right)}}{2 \cdot a \cdot (b^2 + a \cdot b)} \qquad (62)$$

Сила действующая на один клубень:

$$F_{\max} = F_k \cdot \frac{D}{b}, \qquad (63)$$

где: D – диаметр клубня, м.

Нормальные напряжения возникающие в клубне не должны превышать допускаемого напряжения [σ].

Максимальные нормальные напряжения в клубне σ_{max} можно определить, используя решение задачи Герца о давлении шара на плоскость. Это решение имеет вид:

$$s_{\max} = 0{,}338 \cdot \sqrt[3]{4 \cdot F_{\max} \cdot \frac{E_k^{\,2} \cdot E_{ï}^{\,2}}{\left(E_k + E_{ï}\right)^2} \cdot \frac{4}{R_k^{\,2}}} \qquad (64)$$

где: $F_{ï} = F_{\max} \cdot \cos b$ – сила нормального давления клубня на лопасть;

$R_к$ – радиус клубня.

Условие прочности для клубня запишется в виде:

$$0{,}338 \cdot \sqrt[3]{4 \cdot F_{\max} \cdot \cos b \cdot \frac{E_k{}^2 \cdot E_ï{}^2}{\left(E_k + E_ï\right)^2} \cdot \frac{1}{R_k{}^2}} \leq [s] \tag{65}$$

Из (65) находим допустимое значение силы [F]:

$$[F_{\max}]\frac{[s]^3 \cdot (E_k + E_ï)^2 \cdot R_k{}^2}{0{,}338^3 \cdot 4 \cdot \cos b \cdot E_k{}^2 \cdot E_ï{}^2} \tag{66}$$

Сила взаимодействия клубня с лопастью в основном зависит от угловой скорости вращения отбойного валика. Максимально допустимую угловую скорость вращения которого найдем из равенства F_{max} и $[F_{max}]$.

Приравниваем равенства (63) и (66). Тогда с учетом (62) будем иметь:

$$\frac{D}{b} \cdot \frac{2 \cdot c \cdot b \, \mathbf{m} \, (a-b) \cdot \sqrt{(2 \cdot c \cdot b)^2 - 4 \cdot \left(b^2 + a \cdot b\right) \cdot \left(c^2 - a \cdot d\right)}}{2 \cdot a \cdot \left(b^2 + a \cdot b\right)}$$

$$= \frac{[s]^3 \cdot (E_k + E_ï)^2 \cdot R_k{}^2}{0{,}338^3 \cdot 4 \cdot \cos b \cdot E_k{}^2 \cdot E_ï{}^2} \tag{67}$$

При заданных параметрах лопасти, клубня и столона выражения (67) является уравнением относительно угловой скорости вращения отбойного валика.

Сгруппируем члены при одинаковых степенях *с*.

Угловая скорость ω входит только в выражение *с*. Поэтому уравнение (68) можно рассматривать как квадратичное уравнение относительно *с*:

$$c^2 \cdot \left(16 \cdot b^4 - \left[(a-b)^2 \cdot a \cdot b\right]\right) + c \cdot (-8 \cdot b^2 \cdot k) +$$

$$+ \left[k^2 + (a-b)^2 \cdot a \cdot b \cdot d \cdot (a+b)\right] = 0$$

Решая его, получаем:

$$c = \left(-\left(-8 \cdot b^2 \cdot k\right) - \sqrt{\left(-8 \cdot b^2 \cdot k\right)^2 -}\right.$$

$$\overline{- 4 \cdot 16 \cdot b^4 - \left[\left(a-b\right)^2 \cdot a \cdot b\right]\right) \cdot \left[k^2 + \left(a-b\right)^2 \cdot a \cdot b \cdot d \cdot \left(a+b\right)\right]} \Big) \div$$

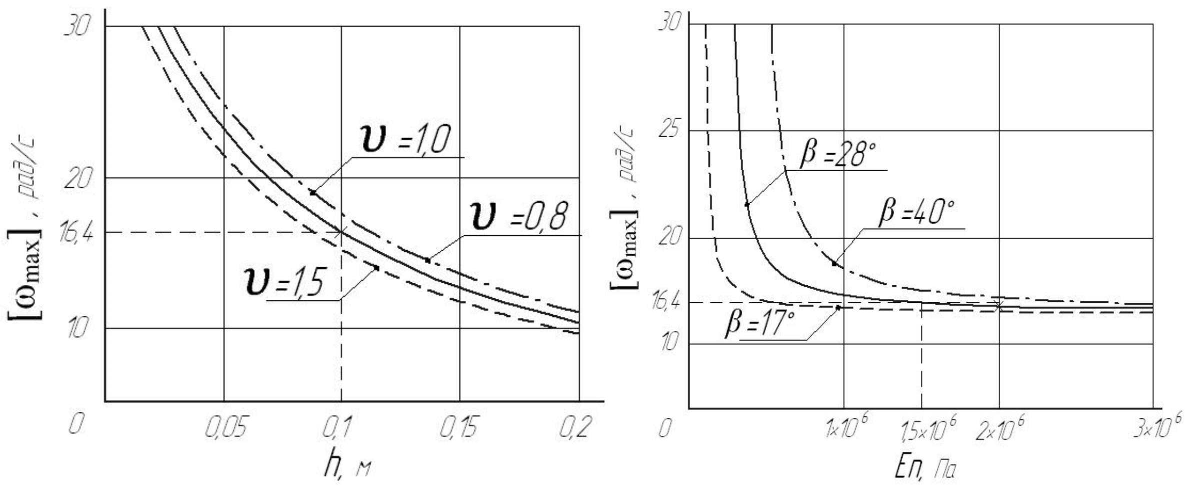
$$\div \left[2 \cdot \left(16 \cdot b^4 - \left[\left(a-b\right)^2 \cdot a \cdot b\right]\right)\right] \tag{69}$$

Используя выражение c из (58), найдем допустимое значение ω:

$$[w]=\left(\frac{c}{t}-u\right)\Big/(R+h) \qquad (70)$$

Для выбора рациональных параметров клубнеотражателя органа выносной сепарации проанализируем графики (рис. 4), полученные на основе выражения (69) и (70). При этом зададим значения следующих величин: $C_б$=0,01 - жесткость столона на растяжение, Н/м; u =1 – скорость клубня, м/с; t =0,05 – продолжительность второй фазы удара, с; D=0,05 – средний диаметр клубня, м; [σ]=0,83 – нормальное напряжение в клубне, Па; $E_к=2,7\cdot10^6$ – модуль упругости (модуль Юнга) клубня, Н/м^2.

а) б)



а) от высоты лопасти при различных величинах скорости движения клубня

б) от материала лопасти при различных величинах угла ее поворота относительно оси вращения отбойного валика

[ω_{max}] – максимально допустимая угловая скорость лопастного отбойного валика, рад/с; β – угол поворота лопасти относительно оси вращения отбойного валика, градус; $E_п$ – модуль упругости лопасти, Па; h - высота лопасти, м; υ - скорость движения клубня, м/с.

Рисунок 4. Зависимость изменения угловой скорости вращения лопастного отбойного валика от его параметров.

Графически зависимость максимально допустимой угловой скорости вращения *[ω_{max}]* лопастного отбойного валика от скорости перемещения клубня на поверхности органа выносной сепарации представлена на рисунке 4а, а зависимость *[ω_{max}]* от модуля упругости материала лопасти $E_П$ при различных величинах угла поворота лопастей относительно своей оси β – на рисунке 4б. Поскольку на большинстве картофелеуборочных машин поступательная скорость полотна выносной сепарации не превышает 1 м/с, и, принимая рабочий зазор установки отбойного валика δ=0,03 м, величину *[ω_{max}]* целесообразно ограничить значением 16,4 рад/с, что соответствует частоте вращения 153 об/мин.

Принимаем максимально допустимую угловую скорость вращения лопастного отбойного валика [ω_{max}]=16,4 рад/с, модуль упругости материала изготовления лопасти $E_п=1,5\cdot10^6$Па, высоту лопасти h=0,1 м, угла поворота лопасти относительно оси вращения отбойного валика β=0,5 рад (≈29 град).

Библиографический список

1. Основные тенденции развития высокопроизводительной техники для картофелеводства / Колчин Н.Н., Бышов Н.В., Борычев С.Н. и др. - Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 4. С. 46-51
2. Рембалович Г.К. Повышение эффективности функционирования и надежности сепарирующей горки картофелеуборочных машин. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева. Саранск, 2005
3. Инновационные решения уборочно-транспортных технологических процессов и технических средств в картофелеводстве /Рембалович Г.К., Бышов Н.В., Борычев С.Н. и др. - Сборник научных докладов ВИМ. 2011. Т. 2. С. 455-461.
4. Технологическое и теоретическое обоснование конструктивных параметров органов вторичной сепарации картофелеуборочных комбайнов для работы в тяжелых условиях/ Н.В. Бышов, С.Н. Борычев, И.А. Успенский [и др.] // Вестник РГАТУ. – 2012. - № 4(16). - С. 87-90.
5. Патент № 2245011, RU, М.кл.2 А 01 D 33/08 Устройство для отделения корнеклубнеплодов от примесей / Борычев С.Н., Рембалович Г.К., Успенский И.А. – Опубл. 12.05.2003.
6. Патент № 63637, RU, М.кл.2 А 01 D 33/08 Устройство для отделения корнеклубнеплодов от примесей / Паршков А.В., Рембалович Г.К., Борычев С.Н. и др. – Опубл. 04.10.2006.
7. Патент № 95960, RU, М.кл.2 А 01 D 33/08 Устройство для отделения корнеклубнеплодов от примесей / Безносюк Р.В., Бышов Д.Н., Рембалович Г.К. и др. – Опубл. 20.07.2010, бюл. №20.

8. Патент № 2454850, RU, М.кл.2 A 01 D 33/08 Устройство для отделения корнеклубнеплодов от примесей / Павлов В.А., Рембалович Г.К., Безносюк Р.В. и др. – Опубл. 14.02.2011.

References

1. Osnovnye tendencii razvitija vysokoproizvoditel'noj tehniki dlja kartofelevodstva / Kolchin N.N., Byshov N.V., Borychev S.N. i dr. - Traktory i sel'hozmashiny. 2012. № 4. S. 46-51
2. Rembalovich G.K. Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovanija i nadezhnosti separirujushhej gorki kartofeleuborochnyh mashin. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehnicheskih nauk / Mordovskij gosudarstvennyj universitet im. N.P. Ogareva. Saransk, 2005
3. Innovacionnye reshenija uborochno-transportnyh tehnologicheskih processov i tehnicheskih sredstv v kartofelevodstve /Rembalovich G.K., Byshov N.V., Borychev S.N. i dr. - Sbornik nauchnyh dokladov VIM. 2011. T. 2. S. 455-461.
4. Tehnologicheskoe i teoreticheskoe obosnovanie konstruktivnyh parametrov organov vtorichnoj separacii kartofeleuborochnyh kombajnov dlja raboty v tjazhelyh uslovijah/ N.V. Byshov, S.N. Borychev, I.A. Uspenskij [i dr.] // Vestnik RGATU. – 2012. - № 4(16). - S. 87-90.
5. Patent № 2245011, RU, M.kl.2 A 01 D 33/08 Ustrojstvo dlja otdelenija korneklubneplodov ot primesej / Borychev S.N., Rembalovich G.K., Uspenskij I.A. – Opubl. 12.05.2003.
6. Patent № 63637, RU, M.kl.2 A 01 D 33/08 Ustrojstvo dlja otdelenija korneklubneplodov ot primesej / Parshkov A.V., Rembalovich G.K., Borychev S.N. i dr. – Opubl. 04.10.2006.
7. Patent № 95960, RU, M.kl.2 A 01 D 33/08 Ustrojstvo dlja otdelenija korneklubneplodov ot primesej / Beznosjuk R.V., Byshov D.N., Rembalovich G.K. i dr. – Opubl. 20.07.2010, bjul. №20.
8. Patent № 2454850, RU, M.kl.2 A 01 D 33/08 Ustrojstvo dlja otdelenija korneklubneplodov ot primesej / Pavlov V.A., Rembalovich G.K., Beznosjuk R.V. i dr. – Opubl. 14.02.2011.