

УДК 631.362.3:635.21

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЛИБРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КАРТОФЕЛЕСОРТИРОВАЛЬНОЙ МАШИНЫ

В.Н. Еднач,

доцент каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ, канд. техн. наук

В.П. Чеботарев,

зав. каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

В статье рассматриваются вопросы, связанные с обоснованием и методикой расчета основных кинематических и технологических параметров калибрующей поверхности картофелесортировальной машины.

Ключевые слова: картофель, сортировка, калибровка, очистка, производительность, качество разделения, фракции.

The article deals with the issues related to the rationale and methodology for calculating the basic kinematic and technological parameters of the calibration surface of the potato sorting machine.

Keywords: potatoes, sorting, calibration, cleaning, productivity, quality of separation, fractions.

Введение

В Республике Беларусь в 2018 году производство картофеля составило 5865 тысяч тонн в хозяйствах всех категорий, при этом в сельскохозяйственных организациях – только 598,6 тысяч тонн. На основании этого можно констатировать, что основной объем картофеля производится населением на приусадебных участках и фермерскими хозяйствами. В Республике Беларусь на конец 2018 года насчитывалось 2652 фермерских хозяйства. Анализ производства картофеля крестьянскими фермерскими хозяйствами за период с 2010 по 2017 гг. показывает неуклонный рост объемов производства. Так, производство картофеля фермерскими хозяйствами в 2017 году выросло до 6 %, что в среднем на каждое хозяйство составляет около 130 тонн. Поэтому фермерские хозяйства нуждаются в машинах для послеуборочной доработки, в частности, сортировальных и калибровальных машинах невысокой производительности. Кроме того, фермерам требуется качественно калибровать клубни картофеля на фракции независимо от их формы.

Целью работы является: обоснование параметров калибрующей поверхности для разделения клубней картофеля на фракции.

Основная часть

В Белорусском государственном аграрном техническом университете разработано простое устройство в виде калибрующей поверхности, образованной продольно расположенными роликами (рис. 1).

Одним из существенных отличий от существующих калибровальных поверхностей картофелесортировальных машин является наличие регулировки кинематического режима работы в зависимости от



а)



б)

Рис. 1. Машина для калибровки картофеля: а) калибратор с чередующимися гладкими и спиральными роликами; б) машина для калибровки картофеля МК-15 с дополнительно установленным роликовым калибратором

формы клубней. Суть регулирования заключается в изменении соотношения окружных скоростей соседних роликов, что исключает защемление клубней и последующее их повреждение. Это существенно сказывается на сохранности и товарном виде обрабатываемого картофеля.

Как известно, основным технологическим показателем работы калибрующей поверхности является удельная производительность, которая зависит от скорости перемещения по ней калибруемого материала, длины и ширины самой поверхности.

Для определения оптимальной скорости перемещения калибруемого материала, при которой ему не наносятся повреждения и сохраняются основные показатели качества процесса, следует рассмотреть взаимодействие клубня картофеля, например, округлой формы с продольными роликами.

Анализ движения клубня во впадине между вращающимися роликами показал, что уменьшение скорости приводит к скапливанию движущихся за ним клубней, и в результате возникает затор. Увеличение скорости ведет к проскакиванию клубней над калибрующей щелью, что уменьшает точность разделения клубней на фракции. Для исключения данных недостатков необходимо наличие конструктивного элемента, позволяющего стабилизировать скорость. В качестве данного элемента предложена спираль, выступы которой подталкивают клубни, стабилизируя производительность калибрующей поверхности. Исключение повреждений от взаимодействия клубней картофеля с выступами спирали возможно при совпадении осевой скорости перемещаемых клубней витками спирали со средней скоростью движения клубней по гладким роликам. В то же время на реальной сортировальной поверхности движение картофеля в установившемся режиме представляет собой сплошной поток, состоящий из клубней различной формы, в связи с чем угол наклона спирали должен обеспечивать оптимальную скорость движения и не должен защемлять клубни.

В результате предварительного анализа было установлено, что точки поверхности клубня при движении по калибрующей роликовой поверхности описывают спираль, форма которой в основном зависит от формы клубня, угла наклона поверхности и частоты вращения роликов. Для упрощения анализа смоделировано в графоаналитическом редакторе «SOLIDWORKS» перемещение клубня шарообразной формы по роликам, расположенным под наклоном к горизонту. Траектория перемещения точки на поверхности клубня имела вид спирали, представленной на рис. 2.

Данная траектория точек была образована в результате двух независимых движений: первого – вращательного, в результате взаимодействия клубня с роликами, второго – поступательного, от скатывания клубня по калибрующей поверхности вдоль роликов. Скорость каждой точки поверхности клубня может быть разложена на поперечную и продольную составляющие. После сопоставления траектории движения точек контакта клубня с роликом, предложена оптимальная величина шага спирали на ролике.

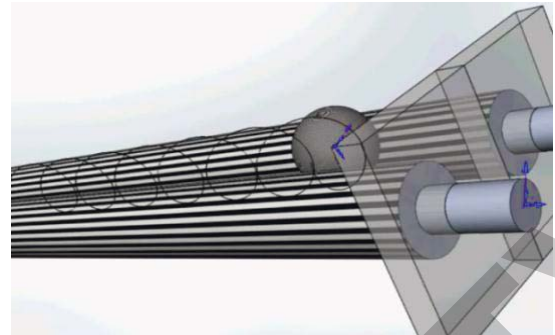


Рис. 2. Траектория движения точки на поверхности клубня при его перемещении по калибрующим роликам

Анализ траектории точки контакта в виде винтовой линии (рис. 3) показал, что в развертке один виток с шагом H будет представлять прямую линию с углом подъема винтовой ψ , длиной развернутой окружности ролика $2\pi R$.

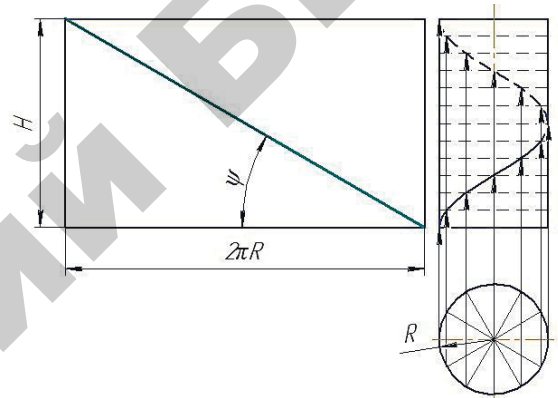


Рис. 3. Развертка цилиндрической винтовой линии

Поскольку траектория движения клубня округлой формы определяется соотношением продольной и поперечной скоростей точек на поверхности клубня, то проекция точки на развертку винтовой линии определяет векторное значение скорости клубня в точке контакта с роликом. Таким образом, скорость движения точки определена из условия траектории ее движения по выражению:

$$V_{т.кл} = \sqrt{V_{вр}^2 + V_{кач}^2}, \quad (1)$$

где $V_{вр}$ – составляющая от окружной скорости роликов (при движении без проскальзывания на ролике), м/с;

$V_{кач}$ – составляющая от поступательной скорости при движении вдоль роликов, м/с.

Угол наклона образующей спирали траектории движения ψ определяется согласно выражению:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{V_{кач}}{V_{вр}}. \quad (2)$$

Угловая скорость вращения клубня ω_k вдоль оси, параллельной оси роликов, в зависимости от скорости вращения ролика ω_p , при отсутствии проскальзывания на ролике будет определена как:

$$V_{вр} = \omega_k \cdot R_k = \omega_p \cdot R, \quad (3)$$

где R – радиус ролика, м;
 R_k – средний радиус клубня, м.

С учетом частоты вращения ролика:

$$V_{вр} = n \cdot 2 \cdot \pi \cdot R, \quad (4)$$

где n – частота вращения ролика, c^{-1} .

Для определения поступательной скорости качения вдоль роликов, рассматривалось продольное перемещение клубня вдоль роликов калибрующей поверхности (рис. 4).

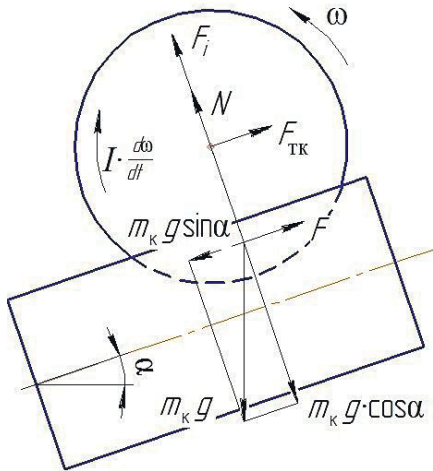


Рис. 4. Схема сил, действующих на клубень

На клубень, находящийся на наклонной поверхности, действуют следующие силы: составляющая силы тяжести $m_k g \sin \alpha$, толкающая клубень в сторону стога, сила трения качения $F_{ТК}$, сила трения скольжения F , которая вызывает вращение клубня вокруг оси, проходящей через центр инерции перпендикулярно поверхности скатывания. Условие равновесия клубня от действующих сил и моментов вращения запишем в следующем виде:

$$\begin{cases} m_k a = m_k g \cdot \sin \alpha - (f_k + f_c) m_k g \cdot \cos \alpha, \\ I \frac{d\omega_k}{dt} = f_c m_k \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot r_{кач}, \\ \sin \alpha = \frac{h_1}{L}, \end{cases} \quad (5)$$

где a – ускорение центра инерции клубня вдоль наклонной плоскости, m/c^2 ;

f_k – коэффициент трения качения клубня;
 f_c – коэффициент трения скольжения клубня;
 L – длина участка поверхности, м;
 I – момент инерции, $H \cdot m^2$;
 h_1 – высота скатывания, м.

Для упрощения расчетов, движущийся вдоль роликов клубень представлен как шар, и момент его инерции будет равен:

$$I = \frac{2}{5} m_k \cdot R_k^2. \quad (6)$$

При движении клубня без проскальзывания по ролику, ускорение может быть выражено через угловое ускорение:

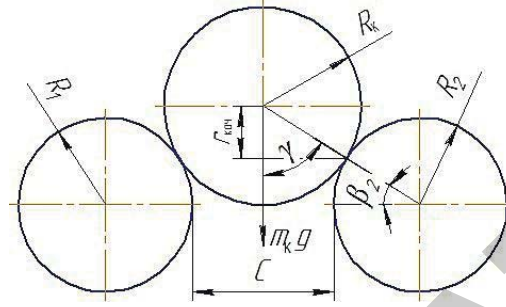


Рис. 5. Положение клубня между двумя роликами

$$a = \frac{d\omega}{dt} \cdot r_{кач}, \quad (7)$$

где $r_{кач}$ – радиус вращения клубня, связанный с точкой касания клубня с роликом, м (рис. 5).

Для расчетов принято условие, при котором $R_1 = R_2$.

$$r_{кач} = R_k \cos \gamma, \quad (8)$$

$$\sin \gamma = \frac{R + C/2}{R_k + R}. \quad (9)$$

В результате система уравнений принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} R_k \cos \gamma = g \cdot \sin \alpha - (f_k + f_c) g \cdot \cos \alpha, \\ \frac{2}{5} R_k^2 \frac{d\omega}{dt} = f_c \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot R_k \cos \gamma. \end{cases} \quad (10)$$

Разделив первое уравнение системы на второе, можно вывести условие скатывания клубня без проскальзывания:

$$\left(R_k \cos \gamma \cdot f_c \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot R_k \cos \gamma \right) / \left(\frac{2}{5} R_k^2 \right) = g \cdot \sin \alpha - (f_k + f_c) g \cdot \cos \alpha, \quad (11)$$

$$\frac{5 \cdot \cos^2 \gamma}{2} = \frac{\text{tg} \alpha - f_c}{f_c} - 1, \quad (12)$$

$$\text{tg} \alpha \leq f_c \left(\frac{5}{2} \cos^2 \gamma + 1 \right) + f_k. \quad (13)$$

Отсюда следуют два важных вывода:

1. Качение клубня без проскальзывания происходит только при таких углах наклона роликов, при которых выполняется условие (13).

2. Так как условие (13) посредством угла γ включает в качестве переменной радиус клубня, то при некотором угле наклона роликов крупные клубни начинают скользить, а мелкие еще катятся, что приводит к затору.

$$\cos^2 \gamma = 1 - \sin^2 \gamma = 1 - \left(\frac{R + C/2}{R_k + R} \right)^2,$$

$$\alpha_{\max} \leq \arctg \left(f_c \left(\frac{5}{2} \cdot \left(1 - \left(\frac{R+C/2}{R_k+R} \right)^2 \right) + 1 \right) + f_k \right). \quad (14)$$

$$\alpha_{\min} \geq \varphi_k. \quad (15)$$

Движение клубня вдоль роликов будет обеспечено при условии:

$$m \cdot g \cdot h = m \cdot V_{\text{кач}}^2 / 2 + I \cdot \omega^2 / 2 + L \cdot f \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha, \quad (16)$$

$$h = L \cdot \sin \alpha. \quad (17)$$

Угловая скорость клубня должна определяться из условия наличия точек контакта клубня с роликами, то есть радиус качения клубня должен определяться как расстояние от оси его вращения до точки контакта:

$$\omega = V_{\text{кач}} / r_{\text{кач}}. \quad (18)$$

При условии, что ролики имеют одинаковый диаметр, задавая радиусом клубня и шириной калибрующей щели C , можем определить радиус качения клубня как

$$r_{\text{кач}} = R_k \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{R+C/2}{R_k+R} \right)^2}. \quad (19)$$

Подставив выражения (17), (18) в выражение (16), получим:

$$m_k \cdot g \cdot L \cdot \sin \alpha = m_k \cdot V_{\text{кач}}^2 / 2 + \frac{2}{5} m_k \cdot R_k^2 \cdot \frac{V_{\text{кач}}^2}{2 \cdot r_{\text{кач}}^2} + L \cdot f \cdot m_k \cdot g \cdot \cos \alpha. \quad (20)$$

После преобразования выражения (20), скорость качения определена как

$$V_{\text{кач}} = \sqrt{\frac{g \cdot L \cdot (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha) \cdot 10 \cdot r_{\text{кач}}^2}{5 \cdot r_{\text{кач}}^2 + 2 \cdot R_k^2}}. \quad (21)$$

Таким образом, скорость точки на поверхности клубня определена как

$$V_{\text{кл}} = \sqrt{(n \cdot 2 \cdot \pi \cdot R)^2 + \frac{g \cdot L \cdot (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha) \cdot 10 \cdot r_{\text{кач}}^2}{5 \cdot r_{\text{кач}}^2 + 2 \cdot R_k^2}}. \quad (22)$$

Угол наклона ψ образующей спирали траектории движения определен как

$$\text{tg } \psi = \frac{\sqrt{\frac{g \cdot L \cdot (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha) \cdot 10 \cdot r_{\text{кач}}^2}{5 \cdot r_{\text{кач}}^2 + 2 \cdot R_k^2}}}{n \cdot 2 \cdot \pi \cdot R}. \quad (23)$$

Анализируя схему развертки спирали (рис. 3), определен шаг спирали:

$$\text{tg } \psi = \frac{H}{2\pi \cdot R}. \quad (24)$$

Приравняв правые части формул (23) и (24), получили шаг спирали:

$$H = \sqrt{\frac{g \cdot L \cdot (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha) \cdot 10 \cdot r_{\text{кач}}^2}{5 \cdot r_{\text{кач}}^2 + 2 \cdot R_k^2}} / n. \quad (25)$$

Заключение

Полученные аналитические выражения отражают прямую зависимость шага спирали от частоты вращения роликов. Это позволяет определить оптимальную производительность поверхности, при которой клубни будут двигаться со скоростью, достаточной, чтобы пройти сквозь калибрующую щель, а не проскакать над ней. При этом более медленные клубни будут транспортироваться спиралью, обеспечивая стабильную производительность поверхности. Определены максимальный и минимальный углы наклона калибрующей поверхности, при которых обеспечивается процесс калибровки клубней картофеля. Для роликов из полиэтилена максимальный угол наклона поверхности составил 45° , а минимальный – 15° .

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/selskoe-hozyaistvo/selskoe-khozyaistvo/graficheskiy-material-grafiki-diagrammy/valovoy-sbor-i-urozhaynost-kartofelya/>. – Дата доступа: 10. 03.2019.
2. Еднач, В.Н. Повышение качества калибровки картофеля поверхности с изменяющейся скоростью вращения роликов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / В.Н. Еднач.; Белорус. гос. аграр. техн. ун-т. – Минск: БГАТУ, 2018. – 24 с.
3. Комлач, Д.И. Расчет основных технических параметров роликового калибратора / Д.И. Комлач, В.Н. Еднач // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб.: в 2 т. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2016. – Вып. 50. – Т. 1. – С. 226-232.
4. Еднач, В.Н. Повышение эффективности предпродажной подготовки картофеля / В.Н. Еднач, Г.А. Радишевский, Д.И. Комлач, А.Л. Рапинчук // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб.: в 2 т. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2013. – Вып. 47. – Т. 1. – С. 181-187.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 18.03.2019