

М. И. Курилович*РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»**Минск, Республика Беларусь**E-mail: labpotato@mail.ru***ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ ВАЛЬЦОВ
ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО ВРАЩЕНИЯ КЛУБНЕЙ КАРТОФЕЛЯ
В ОПТИЧЕСКИХ СОРТИРОВОЧНЫХ МАШИНАХ**

Аннотация. В статье предложена геометрическая модель рабочей поверхности вальцов для транспортировки и вращения клубней картофеля, основанная на аппроксимации формы клубня эллипсоидом вращения. Показано, что при использовании цилиндрических вальцов контакт ограничен одной точкой, что приводит к неустойчивому и хаотичному вращению, затрудняющему оптическую оценку поверхности. Для повышения устойчивости и увеличения площади контакта предлагается форма вальцов в виде однополостного гиперболоида вращения. Разработаны аналитические соотношения, описывающие пересечение эллипсоида и гиперболоида, и выведено уравнение кривой соприкосновения, учитывающее геометрические параметры клубня. Полученная модель обеспечивает увеличенную зону контакта, устойчивое вращение без проскальзывания и пригодна для практической реализации в конструкциях вальцов.

Ключевые слова: картофель, клубень, оптическая сортировка, подающее устройство, вальцы, гиперболоид вращения, эллипсоид вращения, устойчивое вращение.

M. I. Kurylovich*RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"**Minsk, Republic of Belarus**E-mail: labpotato@mail.ru***JUSTIFICATION OF ROLLER GEOMETRY FOR STABLE ROTATION
OF POTATO TUBERS IN OPTICAL SORTING MACHINES**

Abstract. This paper proposes a geometric model of the working surface of potato tuber rollers used for transporting and rotating tubers, based on approximating the tuber shape with an ellipsoid of revolution. It is shown that when using cylindrical rollers, contact is limited to a single point, leading to unstable and chaotic rotation, complicating optical surface assessment. To improve stability and increase the contact area, a single-sheet hyperboloid of revolution roller shape is proposed. Analytical relationships are developed describing the intersection of the ellipsoid and hyperboloid, and an equation for the contact curve is derived, taking into account the geometric parameters of the tuber. The resulting model ensures an increased contact zone, stable rotation without slippage, and is suitable for practical implementation in roller designs.

Keywords: potato, tuber, optical sorting, feeding device, rollers, hyperboloid of revolution, ellipsoid of revolution, stable rotation.

Введение

Современные системы оптической сортировки картофеля требуют получения стабильных и информативных изображений клубней со всех сторон. Качество распознавания напрямую зависит от того, насколько равномерно и предсказуемо клубень вращается в зоне съемки. Если движение нестабильно, а ориентация меняется хаотично, камера фиксирует лишь часть поверхности, что снижает точность классификации и делает невозможным выявление дефектов по всей площади клубня.

Поэтому ключевой задачей при проектировании сортировочных линий становится создание подающего устройства, которое не только транспортирует клубни в зону распознавания, но и обеспечивает их контролируемое вращение. Для этого необходимо, чтобы клубень находился в устой-

чивом положении и не проскальзывал относительно рабочей поверхности. Именно форма валцов определяет характер контакта и, следовательно, качество вращения.

Исследования показывают, что цилиндрические валцы обеспечивают лишь точечный контакт с клубнем, который по морфологии близок к эллипсоиду вращения. Такое взаимодействие приводит к неустойчивому положению и непредсказуемому поведению клубня. Чтобы добиться устойчивого вращения требуется поверхность, способная охватывать клубень по более широкой зоне и обеспечивать несколько точек опоры. Это приводит к необходимости обоснования геометрии валцовой поверхности, которая будет согласована с формой клубня и обеспечит его надежное вращение без проскальзывания.

Основная часть

Так как основное назначение валцовой поверхности в перемещении и одновременном вращении клубней картофеля различной формы и размеров, то было бы правильным выбрать такую форму поверхности валцов, которая бы учитывала многообразие размерных характеристик клубней картофеля.

Для обоснования геометрии валцов принимается, что форма клубня соответствует эллипсоиду вращения. Это допущение основано на морфологических особенностях картофеля, характерных для большинства сортов, где клубень представляет собой тело, приближенное к вытянутому или сплюснутому эллипсоиду [1, 2].

Упрощение формы клубня до эллипсоида вращения необходимо для обеспечения математической строгости и удобства при расчетах, связанных с проектированием рабочей поверхности валцов. Такая геометрическая модель позволяет использовать аналитические выражения для описания контакта, давления и траектории движения клубня, что значительно упрощает моделирование процессов отделения и транспортировки. Благодаря регулярной структуре эллипсоида, допустимо применять методы классической механики и геометрии, избегая сложных численных приближений, что повышает точность и эффективность инженерных решений (рисунок 1).

Таким образом, принятие формы эллипсоида вращения как базовой модели клубня картофеля позволяет рационально спроектировать конструкцию валцов.

Если клубень картофеля расположить между двумя цилиндрическими валцами, то каждой поверхности валцов клубень будет касаться в одной точке (рисунок 2).

При вращении валцов клубень стремится занять положение, при котором его большая ось «симметрии» располагается параллельно осям вращения валцов. Однако при цилиндрической форме валцов площадь контакта оказывается минимальной – фактически точечной. В результате клубень находится в неустойчивом положении и вращается хаотично, что делает невозможной качественную оптическую оценку его поверхности.

Устойчивое вращение клубня может быть обеспечено только при наличии нескольких точек соприкосновения с рабочей поверхностью. Для этого необходимо, чтобы геометрия валцов обеспечивала охват клубня и формировала более широкую зону контакта, позволяя надежно ориентировать его большую ось параллельно осям вращения (рисунок 3).

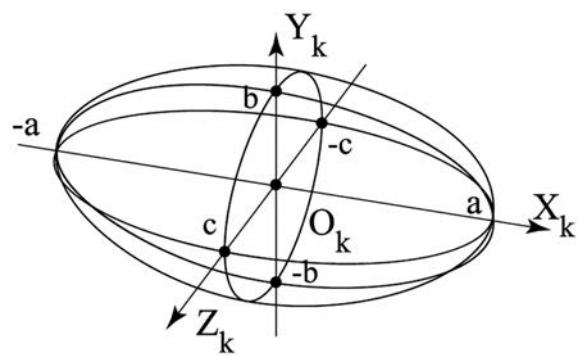


Рисунок 1 – Эллипсоидная форма клубня картофеля

Рисунок 3).

Для согласования теоретической геометрической модели с реальными размерами клубней была выполнена эмпирическая оценка общей длины их поверхности. С этой целью несколько типичных продовольственных клубней разрезали вдоль продольной оси (рисунок 4), после чего полученные срезы прикладывали к миллиметровой бумаге. Контуры одной стороны каждого клубня обводились и последовательно накладывались друг на друга, что позволило сформировать свод-

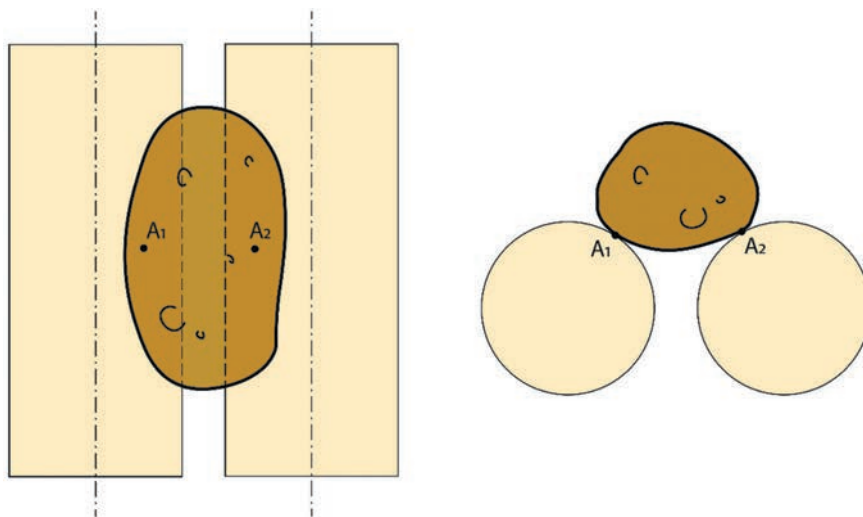


Рисунок 2 – Размещение клубня картофеля на поверхности цилиндрических валцов

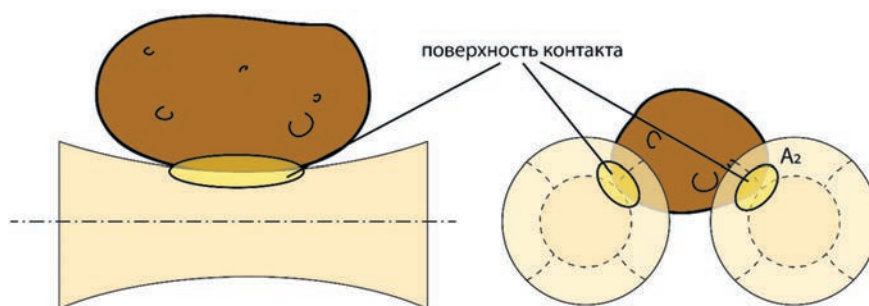


Рисунок 3 – Размещение клубня картофеля на поверхности гиперболических валцов

ную кривую, отражающую характерные особенности продольного профиля клубней. На основе совмещенных контуров была определена средняя длина поверхности, характерная для большинства исследованных образцов (рисунок 5).

Полученная эмпирическая кривая стала основой для уточнения параметров теоретической модели и позволила адаптировать геометрию рабочей поверхности вальца к фактическим размерам клубней. Сопоставление экспериментальных данных с аналитическими выражениями показало, что для обеспечения достаточной площади контакта и устойчивого вращения клубня наиболее рациональной формой вальца является однополостный гиперboloид вращения (рисунок 6). Такая поверхность обеспечивает охват клубня по широкой зоне, формирует несколько



Рисунок 4 – Данные для определения общей кривой

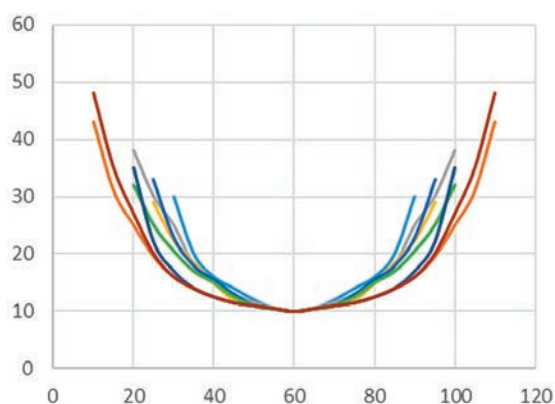


Рисунок 5 – График общей кривой поверхности клубней

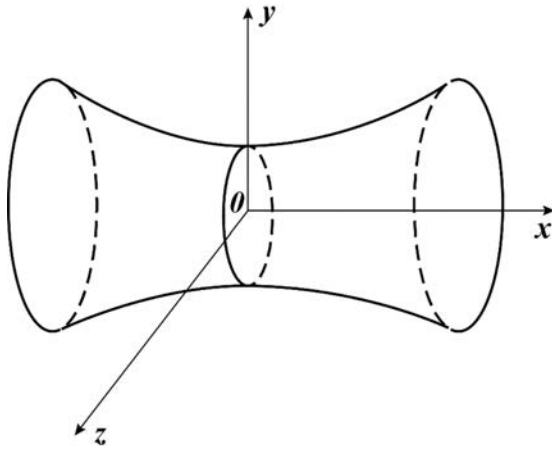


Рисунок 6 – Однополостный гиперболоид вращения

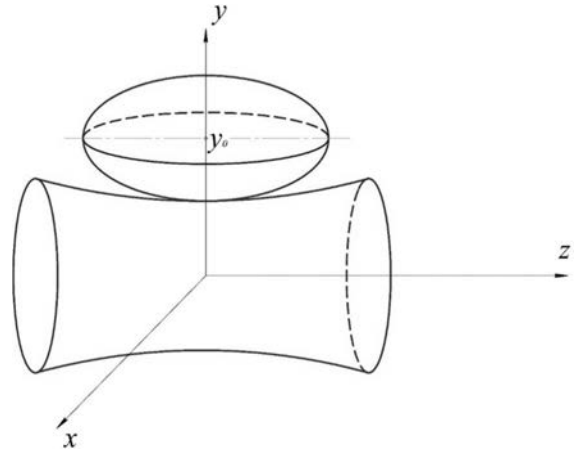


Рисунок 7 – Схема соприкосновения эллипсоида и гиперболоида в пространстве

точек опоры и тем самым создает условия для надежного вращения без проскальзывания в зоне распознавания.

Такой выбор обусловлен следующими факторами:

- геометрическая совместимость (гиперболоид вращения обладает вогнутой поверхностью, способной охватывать эллипсоид по широкой зоне);
- технологическая эффективность (увеличенная площадь контакта способствует устойчивому положению клубня и способствует вращению без проскальзывания);
- конструктивная реализация (однополостный гиперболоид легко реализуется в механической обработке и допускает параметрическую настройку).

Для дальнейшего проектирования необходимо вывести уравнение кривой поверхности вальца, которое будет учитывать геометрию клубня. Поверхность гиперболоида в некоторой прямоугольной системе координат определяется уравнением

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1, \quad (1)$$

где a и b – действительные полуоси, c – мнимая полуось.

Каноническое уравнение эллипсоида в декартовых координатах (рисунок 7)

$$\frac{x^2}{a_1^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b_1^2} + \frac{z^2}{c_1^2} = 1. \quad (2)$$

При $x = 0$ уравнения (1), (2) принимают вид (3), (4) соответственно:

$$\frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1, \quad (3)$$

$$\frac{(y - y_0)^2}{b_1^2} + \frac{z^2}{c_1^2} = 1. \quad (4)$$

Схема соприкосновения эллипса и гиперболы на плоскости представлена на рисунке 8.

Точка пересечения эллипса и гиперболы опишется следующим уравнением:

$$\begin{cases} \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1 \\ \frac{(y - y_0)^2}{b_1^2} + \frac{z^2}{c_1^2} = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{z^2}{c^2} = \frac{y^2}{b^2} - 1 \\ \frac{(y - y_0)^2}{b_1^2} + \frac{z^2}{c_1^2} = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} z^2 = \frac{c^2}{b^2} y^2 - c^2 \\ \frac{(y - y_0)^2}{b_1^2} + \frac{\frac{c^2}{b^2} y^2 - c^2}{c_1^2} = 1 \end{cases}. \quad (5)$$

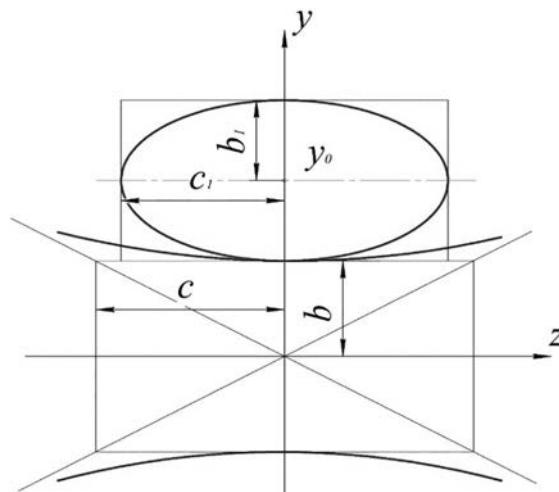


Рисунок 8 – Схема соприкосновения эллипса и гиперболы на плоскости

Тогда

$$y = b \sqrt{\frac{2c_1^2 y_0 - y_0^2 c_1^2 + c^2 b_1^2 + b_1^2 c_1^2}{c_1^2 b^2 + b_1^2 c^2}}. \quad (6)$$

Также можно определить кривую касания эллипсоида и гиперболы

$$\begin{cases} \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1 \\ \frac{x^2}{a_1^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b_1^2} + \frac{z^2}{c_1^2} = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x^2 = a^2 - \frac{a^2}{b^2} y^2 + \frac{a^2}{c^2} z^2 \\ \frac{a^2 - \frac{a^2}{b^2} y^2 + \frac{a^2}{c^2} z^2}{a_1^2} + \frac{(y-b-b_1)^2}{b_1^2} + \frac{z^2}{c_1^2} = 1 \end{cases}. \quad (7)$$

Отсюда уравнение кривой гиперboloида вращения опишется следующим образом:

$$\frac{(y-b-b_1)^2}{b_1^2} - \frac{a^2}{b^2 a_1^2} y^2 + z^2 \left(\frac{1}{c^2} + \frac{a^2}{a_1^2 c^2} \right) = 1 - \frac{a^2}{a_1^2}. \quad (8)$$

Данное уравнение кривой гиперboloида вращения позволяет определить оптимальную форму поверхности, обеспечивающую максимальный охват клубня вальцами.

Заключение

В результате исследования установлено, что переход от цилиндрической к гиперboloидной форме вальцов существенно увеличивает площадь контакта с клубнем и обеспечивает более устойчивое и предсказуемое вращение. Выведенные аналитические выражения для пересечения эллипсоида и гиперboloида позволяют параметрически настроить профиль вальца под типичные размеры клубней.

Практическая реализация однополостного гиперboloида вращения технически осуществима и обеспечивает преимущества в технологических процессах сортировки и оптического контроля: уменьшение проскальзывания, стабильная ориентация большой оси клубня и улучшение качества съемки.

Список использованных источников

1. Павлов, А. Е. Калибровка клубней картофеля / А. Е. Павлов, Л. А. Павлова // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ им. В. П. Горячкина. – 2017. – № 3. – С. 15–19.
2. Волосевич, П. Н. Геометрическая интерпретация формы и размерно-массовые характеристики клубней картофеля как объекта калибрования / П. Н. Волосевич // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ им. В. П. Горячкина. – 2008. – № 1. – С. 70–73.