

Аналитическое исследование взаимодействия рабочего элемента очистителя головок корнеплодов

Борис Борисов, Владимир Булгаков, Андрей Борис

Analytical study of interaction working head cleaner element roots: Analytical dependences of effort cleaning element of the new separator tops when driving on the head of sugar beet and the decision of the expressions obtained for the PC. We construct a graph of change of the components of normal reaction at the point of contact with the head of the operating element root. The values of the normal components of the reaction were used in the future for the power analysis of this interaction.

Key words: mathematical model; greens; root vegetable; root crop head; work item; the point of contact; the force interaction.

ВВЕДЕНИЕ

Сахарная свёкла является стратегической культурой, поскольку сахар, жом и зеленая масса ботвы являются полезными продуктами для людей и животных. Ключевым вопросом при производстве сахарной свёклы является ее уборка. Особенного внимания заслуживает операция среза ботвы с головок на корню. Так, незначительное количество остатков ботвы на головках корнеплодов перед их уборкой значительно ухудшает качественные показатели, что в целом может снизить качество на 10-15 %. Поэтому отделение ботвы с головок корнеплодов является актуальным научно-техническим заданием.

Вопросами теоретических и экспериментальных исследований отделения ботвы с головок корнеплодов посвящены многие труды П.М. Василенки, В.М. Булгакова, Л.В. Погорелого, П.В. Савича, Н.В. Татьяна, Н.М. Хелемендика, Р.Б. Гевка, И.В. Головача, В.Я. Мартыненко, Н.М. Зуев, Я.И. Козіброди, С.А. Топоровского, А.П. Гурченка, А.Н. Кобца, С.В. Синего, В.М. Осуховского, Я.А. Павлова, Н.Г. Березового, И.Е. Кравченка [1, 2, 3, 4, 9, 10, 15].

Методика исследования. Для исследования использованы методы теоретической механики. Рассмотрено движение единичного рабочего элемента по головке корнеплода сахарной свеклы. Принято допущение, что масса рабочего элемента сосредоточена в точке контакта его с головкой корнеплода. Рассмотрен случай движения рабочего элемента как материальной точки.

Для определения усилий, которые возникают при взаимодействии рабочего элемента с головкой корнеплода, вначале была построена эквивалентная схема (рис.1), на которой рабочий элемент при вращательном движении, а также при поступательном перемещении контактирует с головкой корнеплода сахарной свёклы.

В точке K контакта рабочего элемента с головкой корнеплода будут действовать следующие силы: \vec{Q} – сила счесывания ботвы [7], которая направлена по касательной к поверхности головки корнеплода, в сторону вектора абсолютной скорости точки M рабочего элемента; \vec{N} – нормальная реакция со стороны головки корнеплода, направленная вдоль нормали \vec{n} к головке корнеплода, проведенной через данное положение точки контакта; $\vec{F}_{\text{од}}$ – сила трения, которая возникает при движении рабочего элемента по головке корнеплода, направлена в сторону, противоположную направлению вектора абсолютной скорости точки M рабочего элемента, совпадает с точкой контакта K и представлена в виде составляющих на оси x и y ; \vec{G} – сила веса рабочего элемента.

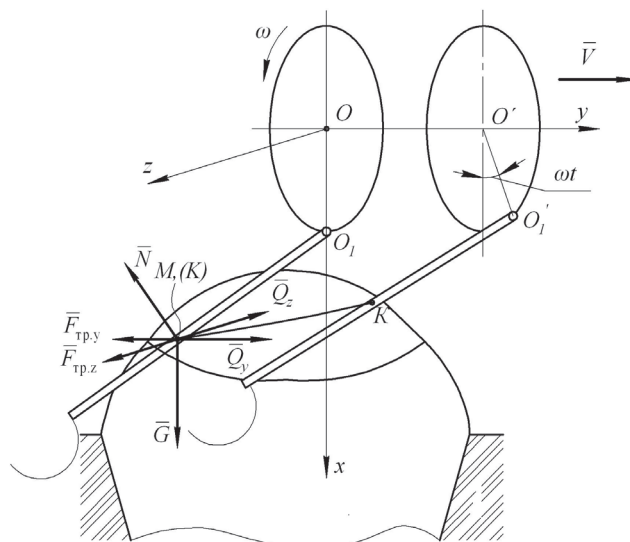


Рис.1. Эквивалентная схема взаимодействия рабочего элемента отделителя ботвы с головкой корнеплода сахарной свёклы.

Результаты исследования. Дифференциальное уравнение движения точки контакта K по головке корнеплода в векторной форме будет иметь такой вид [11,12]:

$$m\bar{a} = \bar{Q} + \bar{N} + \bar{F}_{\text{от}} + \bar{G}, \quad (1)$$

где \bar{a} – абсолютное ускорение движения точки контакта K по головке корнеплода; m – масса рабочего элемента, приведённая к точке контакта.

После подстановки в (1) необходимых величин и необходимых преобразований получена система нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка относительно неизвестных функций $x(t)$, $y(t)$ и $z(t)$ и неизвестной нормальной реакции N :

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= Q \frac{\dot{x}}{V} + N \frac{x}{R} - f \frac{\dot{x}}{V} N + mg, \\ m\ddot{y} &= Q \frac{\dot{y}}{V} + N \frac{y}{R} - f \frac{\dot{y}}{V} N, \\ m\ddot{z} &= Q \frac{\dot{z}}{V} + N \frac{z}{R} - f \frac{\dot{z}}{V} N, \\ x^2 + y^2 + z^2 - R^2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Систему дифференциальных уравнений (2) можно решить лишь численными методами с использованием компьютерных программ при заданных начальных условиях. Поскольку, в систему дифференциальных уравнений (2) входит неизвестный силовой фактор нормальная реакция N , то для ее определения было проведено исследование кинематики взаимодействия рабочего элемента с головкой корнеплода. В результате этого исследования получена зависимость угла отклонения φ рабочего элемента и его углового ускорения $\ddot{\varphi}$ от времени.

С учетом предположений о том, что головка корнеплода сахарной свёклы есть абсолютно твердое тело, а рабочий элемент безотрывно контактирует с корнеплодом, было составлено дифференциальное уравнение вращательного движения рабочего элемента вокруг собственной оси подвеса в момент его взаимодействия с головкой корнеплода [6]:

$$J\ddot{\varphi} + \sum M = 0, \quad (3)$$

где $\sum M$ – сумма моментов центробежных сил инерции, что действуют на рабочий элемент.

Из уравнения (8) после алгебраических преобразований [5, 8], определена нормальная реакция на корнеплод сахарной свеклы при воздействии на него системы из двух рабочих элементов:

$$N = \frac{J\ddot{\varphi}_2 + M_{R2} \sqrt{\sin^2 \varphi_2 \cos^2 \alpha + \cos^2 \varphi_2} m_{21}}{\sqrt{\left[(r_0 + l_{rr} \cos \varphi_2) \cos \alpha - \frac{b}{2} \sin \alpha \right]^2 + \left[(r_0 + l_{rr} \cos \varphi_2) \sin \alpha - \frac{b}{2} \cos \alpha \right]^2}}, \quad (4)$$

$$\sqrt{\left[\rho \sin(\alpha_0 + \omega t) \right]^2 + \left[-tg\varphi_0 \left(\sqrt{\delta^2 + (d-h)^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} - r_0 \right) - Vt \right]^2}$$

где δ – отклонение оси ротора от условной осевой линии рядка;

b – конструктивная ширина рабочего элемента;

M_R и M_{R2} – моменты центробежных сил инерции предыдущего и следующего рабочих элементов относительно их осей подвеса;

m_{21} – плечо нормальной реакции действия следующего рабочего элемента на предыдущий относительно его оси подвеса;

φ_2 – угол отклонения следующего рабочего элемента от плоскости вращения;

α – угол поворота вала ротора;

ρ – расстояние от оси ротора до вершины головки корнеплода;

d – расстояние от оси ротора до уровня поверхности почвы;

r_0 – радиус оси подвеса рабочего элемента;

l_{rn} – длина копирующей части рабочего элемента.

Двигаясь по головке корнеплода, рабочий элемент может действовать на нее в продольном направлении рядка и в поперечном, а также сжимать головку корнеплода в вертикальном направлении. Это предопределено наличием силовых факторов, которые представляют собой проекции общей нормальной реакции на указанные направления. В частности, составляющая нормальной реакции N_z вызывает выбивание корнеплодов в поперечном направлении, а N_y в продольном направлении относительно рядка. Вертикальная же составляющая нормальной реакции N_x обеспечивает необходимое усилие в контакте “головка корнеплода-рабочий элемент”. Эти силы влияют на такие показатели качества процесса отделения ботвы, как повреждение и выбивание головок корнеплодов. Они имеют следующие значения:

$$N_x = \left[\frac{\gamma s l \omega^2 \left(\frac{1}{2} r_0 \sin \varphi + \frac{l^2}{6} \sin 2\varphi \right)}{OK} + \frac{\ddot{\varphi}}{OK} \right] \cos \omega t \times$$

$$\times \sin \left[\varphi_0 + \text{arccctg} \left(\frac{-tg\varphi_0 \left(\sqrt{\delta^2 + (d-h)^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} - r_0 \right) - Vt}{\sqrt{\delta^2 + (d-h)^2} \sin \left[\omega t - \arccos \left(\frac{b}{2\sqrt{\delta^2 + (d-h)^2}} \right) \right] - r_0} \right) \right], \quad (5)$$

$$N_y = \left[\frac{\gamma s l \omega^2 \left(\frac{1}{2} r_0 \sin \varphi + \frac{l^2}{6} \sin 2\varphi \right)}{OK} + \frac{\ddot{\varphi}}{OK} \right] \times$$

$$\times \cos \left[\varphi_0 + \operatorname{arccctg} \left(\frac{-\operatorname{tg} \varphi_0 \left(\sqrt{\delta^2 + (d-h)^2} - \left(\frac{b}{2} \right)^2 - r_0 \right) - Vt}{\sqrt{\delta^2 + (d-h)^2} \sin \left[\omega t - \operatorname{arccos} \left(\frac{b}{2\sqrt{\delta^2 + (d-h)^2}} \right) \right] - r_0} \right) \right], \quad (6)$$

$$N_z = \left[\frac{\gamma s l \omega^2 \left(\frac{1}{2} r_0 \sin \varphi + \frac{l^2}{6} \sin 2\varphi \right)}{OK} + \frac{\ddot{\varphi}}{OK} \right] \times$$

$$\times \sin \left[\varphi_0 + \operatorname{arccctg} \left(\frac{-\operatorname{tg} \varphi_0 \left(\sqrt{\delta^2 + (d-h)^2} - \left(\frac{b}{2} \right)^2 - r_0 \right) - Vt}{\sqrt{\delta^2 + (d-h)^2} \sin \left[\omega t - \operatorname{arccos} \left(\frac{b}{2\sqrt{\delta^2 + (d-h)^2}} \right) \right] - r_0} \right) \right], \quad (7)$$

где N_x - вертикальная составляющая нормальной реакции, которая будет деформировать головку корнеплода и прижимать корнеплод в глубину почвы;

N_y - горизонтальная составляющая нормальной реакции, которая будет выбивать корнеплод в направлении движения машины;

N_z - горизонтальная составляющая нормальной реакции, которая будет выбивать корнеплод в направлении перпендикулярном оси ротора.

По результатам численного моделирования на ПЭВМ были построены графические зависимости (рис.2-4) указанных составных сил от времени.

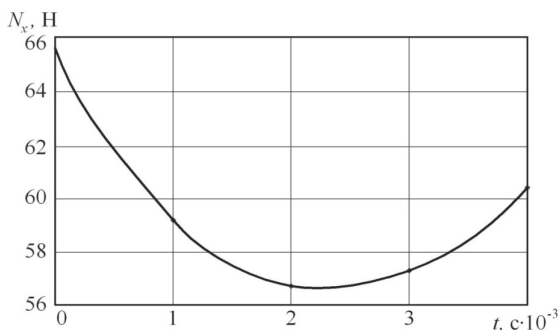


Рис.2. Зависимость вертикальной составляющей N_x нормальной реакции от времени.

Как видим из графиков (рис.2-4) максимальные значения указанных составляющих нормальной реакции N , составляют $N_{x\max} = 65,0 \text{ Н}$, $N_{y\max} = 55,0 \text{ Н}$, $N_{z\max} = 15,0 \text{ Н}$. Эти значения были в дальнейшем использованы при моделировании силового взаимодействия очистительного элемента с головкой корнеплода сахарной свеклы.

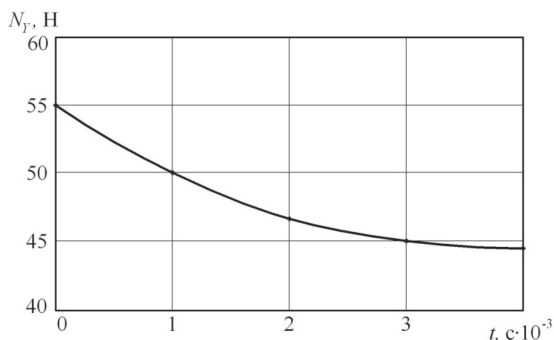


Рис.3. Зависимость продольно-горизонтальной составляющей N_y нормальной реакции от времени.

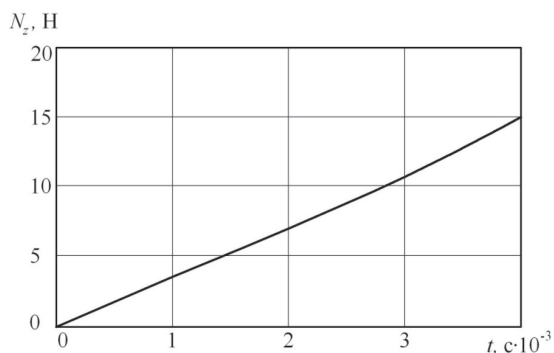


Рис.4. Зависимость поперечно-горизонтальной составляющей N_z нормальной реакции от времени.

Решив систему уравнений (2) относительно неизвестных функций $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ получено уравнение траектории движения точки контакта К по головке корнеплода в параметрической форме:

$$\left. \begin{aligned} x &= x(t), \\ y &= y(t), \\ z &= z(t). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Длина пространственной кривой выражается в виде:

$$L = \int_0^{t_1} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} dt, \quad (9)$$

где t_1 – время контакта копирующей части с головкой корнеплода.

Это дает возможность найти площадь счесывания $S_{зч}$ за время контакта рабочего элемента с головкой корнеплода. Площадь счесывания ботвы равна:

$$S_{зч} = Lb. \quad (10)$$

Таким образом, аналитически найдено выражение площади счесывания, нового отделителя ботвы.

ВЫВОДЫ

1. Составлена система дифференциальных уравнений второго порядка, описывающая движение точки контакта рабочего элемента по головке неподвижно закрепленного в почве корнеплода сахарной свёклы.

2. В результате решения полученной системы уравнений найдено аналитическое выражение для определения площади срезанной поверхности с головки корнеплода одним рабочим элементом.

3. В результате решения дифференциального уравнения вращательного движения рабочего элемента найдено аналитическое выражение нормальной реакции головки корнеплода на рабочий элемент.

4. Таким образом, на основании математического моделирования полученные значения нормальных реакций, действующих в точке контакта рабочего элемента с головкой корнеплода. А именно, $N_{x\max} = 65,0 \text{ Н}$, $N_{y\max} = 55,0 \text{ Н}$, $N_{z\max} = 15,0 \text{ Н}$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Булгаков В. М. Теория бурякозбиральных машин. Монография / В.М. Булгаков. - Київ: Видавничий центр НАУ, 2005. – 245 с.
- [2] Василенко П. М. Основы научных исследований (Механизация сельскохозяйственного производства) / П. М. Василенко, Л. В. Погорелый. –К.: Вища школа, 1984. – 266 с.
- [3] Комплексная механизация производства сахарной свеклы / [А. А. Василенко, П. Т. Бабий, П. В. Савич и др.]. – К., 1962. – 243 с.
- [4] Погорелый Л. В. Свеклоуборочные машины: история, конструкция, теория, прогноз / Л. В. Погорелый, Н. В. Татьяна –К.: Феникс, 2004. – 232 с.
- [5] Фильчаков П. Ф. Справочник по высшей математике / П. Ф. Фильчаков. – К.: Научная мысль, 1974. – 743 с.
- [6] Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики: учебн. [для высш. технич. заведений] / С. М. Тарг. – М.: Высш. шк., 1986. – 416 с.
- [7] Писаренко Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. - Киев: "Наукова думка", 1975. – 704 с.
- [8] Основные математические формулы / [Воднев В.Т., Наумович А.Ф., Наумович Н.Ф.]; под ред. Ю. С. Богднова. – Минск.: Вышэйшая школа, 1988. – 255 с.
- [9] Хелемендик Н. М. Повышение механико-технологической эффективности трудоемких процессов в свекловодстве: автореф. дис. на соискание науч. степени докт. техн. наук.: спец. 05.20.01 "Механизация сельскохозяйственного производства" / Н. М. Хелемендик. – Тернополь.: ТПІ, 1996. – 48 с.
- [10] Хелемендик Н. М. Исследование технологического процесса и рабочих органов для уборки сахарной свеклы в условиях Западной Степи СССР : Дисс. . канд. техн. наук.: 05.410 / Хелемендик Николай Михайлович. – Воронеж, 1968. – 31 с.
- [11] Бать М. И. Теоретическая механика в примерах и задачах: уч. пособие / Бать М. И., Джанилидзе Г. Ю., Кельзон А. С. – М.: Наука 1973. – 488 с.
- [12] Бутенин Н. В. Курс теоретической механики / Бутенин Н. В., Лунц Я. Л., Меркин Д. Р. Т. 2. – М.: Наука, 1985. – 496 с.
- [13] ВИСХОМ. Физико-механические свойства растений, почв и удобрений: методы исследования, приборы, характеристики. – М.: Колос, 1970. – 417 с.
- [14] Вовк П. Ф. Агрофизические свойства корней сахарной свеклы в связи с механизацией уборки / П. Ф. Вовк. // В сб.: Теория, конструкция и производство сельскохозяйственных машин. Т. 2. – Л.: Сельхозгиз, 1936. – С. 269-284.
- [15] Механико-технологические свойства сельскохозяйственных материалов: практикум / [Царенко О. М., Яцун С. С. и др.]; за ред. С. С. Яцуна. – К.: Аграрное образование, 2000. – 93 с.

Адрес за контакти:

Проф. Владимир Булгаков - vbulgakov@meta.ua
Проф. Борис Борисов - bborisov@uni-ruse.bg

Докладът е рецензиран.