

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ РАБОЧЕГО ЭЛЕМЕНТА  
КОПИРНО-РОТОРНОГО ОТДЕЛИТЕЛЯ БОТВЫ ПО ГОЛОВКЕ  
КОРНЕПЛОДА**

**TRAFFIC STUDY OF THE ELEMENTS SINKING ROTARY SEPARATOR  
TOPPER ON THE HEAD OF ROOT CROPS**

Владимир Булгаков<sup>1</sup>, Иван Головач<sup>1</sup>, Андрей Борис<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины  
Киев 03041, Украина

Email: mechanics@nauu.kiev.ua

<sup>2</sup>Национальный научный центр “Институт механизации и электрификации  
сельского хозяйства”, смт. Глеваха 08631, Украина

Email: aborys@ukr.net

На основании построенной математической модели движения очистительного элемента нового отделителя ботвы по головке корнеплода сахарной свёклы и решения полученных выражений на ПЕОМ получены аналитические зависимости усилий в указанной точке контакта. Построены графические зависимости изменения составляющих нормальной реакции в точке контакта рабочего элемента с головкой корнеплода. Значения составляющих нормальной реакции были использованы в дальнейшем для силового анализа указанного взаимодействия.

*Математическая модель, ботва, корнеплод, головка корнеплода, рабочий элемент, точка контакта, силовое взаимодействие.*

### **Введение**

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

Вопросами теоретических и экспериментальных исследований отделения ботвы из головок корнеплодов посвящены численные труды П. М. Васи-

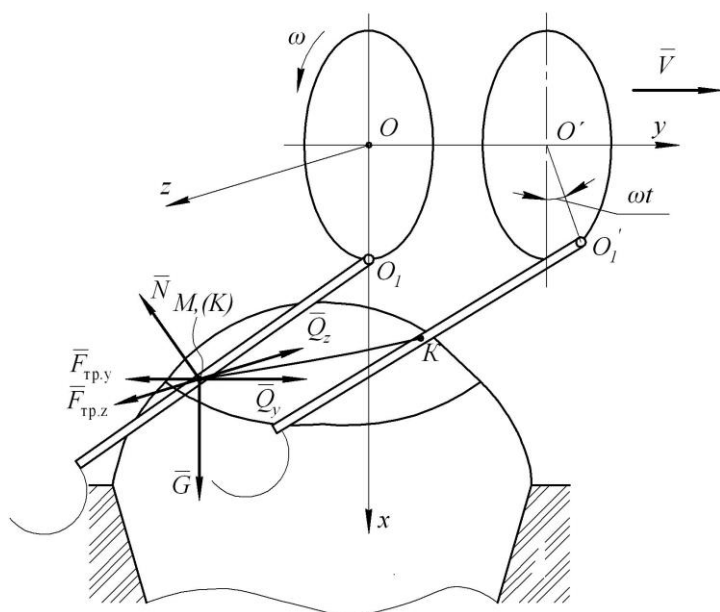
ленка, В. М. Булгакова, Л. В. Погорелого, П. В. Савича, М. В. Татьяна [1, 2, 3, 4, 9, 10, 13, 14, 15].

### Цель исследования

Аналитическое определение усилий, которые возникают в точке контакта рабочего элемента отделителя ботвы с головкой корнеплода сахарной свёклы.

### Объект и методика исследования

Изложение основного материала исследования. Для определения усилий, которые возникают при взаимодействии рабочего элемента с головкой корнеплода, нами в первую очередь построена эквивалентная схема (рис. 1), на которой рабочий элемент при вращательном движении, а также поступательном перемещении контактирует с головкой корнеплода.



**Рис. 1.** Эквивалентная схема взаимодействия рабочего элемента с головкой корнеплода

**Fig. 1.** The equivalent circuit of the interaction of a work item with the head of root crops

В точке  $K$  контакта рабочего элемента с головкой корнеплода будут действовать следующие силы:  $\bar{Q}$  – сила счесывания ботвы [7], которая направлена по касательной к поверхности головки корнеплода, в сторону вектора абсолютной скорости точки  $M$  рабочего элемента;  $\bar{N}$  – нормальная

реакция со стороны головки корнеплода, направленная вдоль нормали  $\bar{n}$  к головке корнеплода, проведенной сквозь данное положение точки контакта;  $\bar{F}_{\partial\partial}$  – сила трения, которое возникает при движении рабочего элемента по головке корнеплода, направлена в сторону, противоположную направлению вектора абсолютной скорости точки  $M$  рабочего элемента, которая совпадает с точкой контакта  $K$ , которая представлена в виде составляющих на оси  $x$  и  $y$ ;  $\bar{G}$  – сила веса рабочего элемента.

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

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

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

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

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

Таким образом, полученная система нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка относительно неизвестных функций  $x(t)$ ,  $y(t)$  и  $z(t)$  и неизвестной нормальной реакции  $N$ . 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 полученная зависимость угла отклонения рабочего элемента  $\varphi$  и его углового ускорения  $\ddot{\varphi}$  от времени.

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

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

## Результаты исследования

Из уравнения (3) и после алгебраических преобразований [5,8], определено нормальную реакцию на корнеплод сахарной свеклы при действии на него системы из двух рабочих элементов:

$$N = \frac{J\ddot{\varphi} + M_R - \frac{J\ddot{\varphi}_2 + M_{R2} \sqrt{\sin^2 \varphi_2 \cos^2 \alpha + \cos^2 \varphi_2} m_{21}}{\sqrt{\left[ (r_0 + l_{II} \cos \varphi_2) \cos \alpha - \frac{b}{2} \sin \alpha \right]^2 + \left[ (r_0 + l_{II} \cos \varphi_2) \sin \alpha - \frac{b}{2} \cos \alpha \right]^2}}}{\sqrt{\left[ \rho \sin(\alpha_0 + \omega t) \right]^2 + \left[ -tg \varphi_0 \left( \sqrt{\delta^2 + (d-h)^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} - r_0 \right) - Vt \right]^2}}, \quad (4)$$

где  $\delta$  – 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;  $\varphi_2$  – угол отклонения следующего рабочего элемента от плоскости вращения;  $\alpha$  – угол поворота вала ротора;  $\rho$  – расстояние от оси ротора к вершине головки корнеплода;  $d$  – расстояние от оси ротора к основе почвы;  $r_0$  – радиус оси подвеса рабочего элемента;  $l_{II}$  – длина копирующей части рабочего элемента.

Двигаясь по головке корнеплода, рабочий элемент может действовать на нее в продольном направлении рядка и в поперечном, а также он сжимает головку корнеплода в вертикальном направлении. Это предопределено наличием силовых факторов, которые являют 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  $N_x$ , который 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:

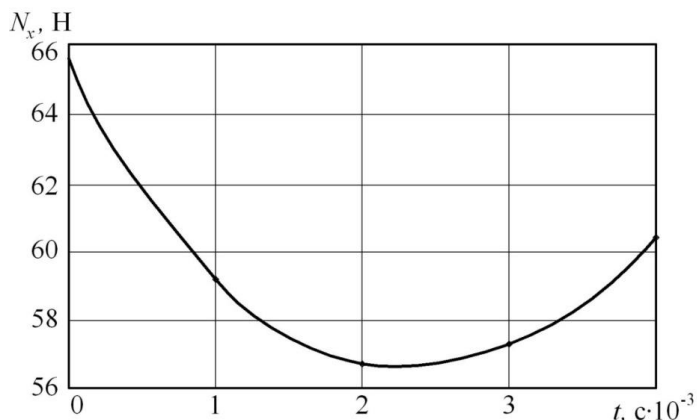
$$N_x = \left[ \frac{\gamma sl \omega^2 \left( \frac{1}{2} r_0 \sin \varphi + \frac{l^2}{6} \sin 2\varphi \right)}{OK} + \frac{\ddot{\varphi}}{OK} \cos \omega t \times \sin \varphi_0 + \right. \\ \left. + \operatorname{arctg} \frac{-\operatorname{tg} \varphi_0 \left( \sqrt{\delta^2 + (d-h)^2} - \left( \frac{b}{2} \right)^2 - r_0 \right) - Vt}{\sqrt{\delta^2 + (d-h)^2} \sin \left[ \omega t - \arccos \left( \frac{b}{2\sqrt{\delta^2 + (d-h)^2}} \right) \right] - r_0} \right], \quad (5)$$

$$N_y = \left[ \frac{\gamma sl \omega^2 \left( \frac{1}{2} r_0 \sin \varphi + \frac{l^2}{6} \sin 2\varphi \right)}{OK} + \frac{\ddot{\varphi}}{OK} \times \cos \varphi_0 + \right. \\ \left. + \operatorname{arctg} \frac{-\operatorname{tg} \varphi_0 \left( \sqrt{\delta^2 + (d-h)^2} - \left( \frac{b}{2} \right)^2 - r_0 \right) - Vt}{\sqrt{\delta^2 + (d-h)^2} \sin \left[ \omega t - \arccos \left( \frac{b}{2\sqrt{\delta^2 + (d-h)^2}} \right) \right] - r_0} \right], \quad (6)$$

$$N_z = \left[ \frac{\gamma sl \omega^2 \left( \frac{1}{2} r_0 \sin \varphi + \frac{l^2}{6} \sin 2\varphi \right)}{OK} + \frac{\ddot{\varphi}}{OK} \times \sin \varphi_0 + \right. \\ \left. + \operatorname{arctg} \frac{-\operatorname{tg} \varphi_0 \left( \sqrt{\delta^2 + (d-h)^2} - \left( \frac{b}{2} \right)^2 - r_0 \right) - Vt}{\sqrt{\delta^2 + (d-h)^2} \sin \left[ \omega t - \arccos \left( \frac{b}{2\sqrt{\delta^2 + (d-h)^2}} \right) \right] - r_0} \right], \quad (7)$$

где:  $N_x$  – вертикальная составляющая нормальной реакции, которая будет деформировать головку и притискивать корнеплод в глубину почвы;  $N_y$  – горизонтальная составляющая нормальной реакции, которая будет вываливать корнеплод в направлении движения машины;  $N_z$  – горизонтальная составляющая нормальной реакции, которая будет выбивать корнеплод в направлении перпендикулярном оси ротора.

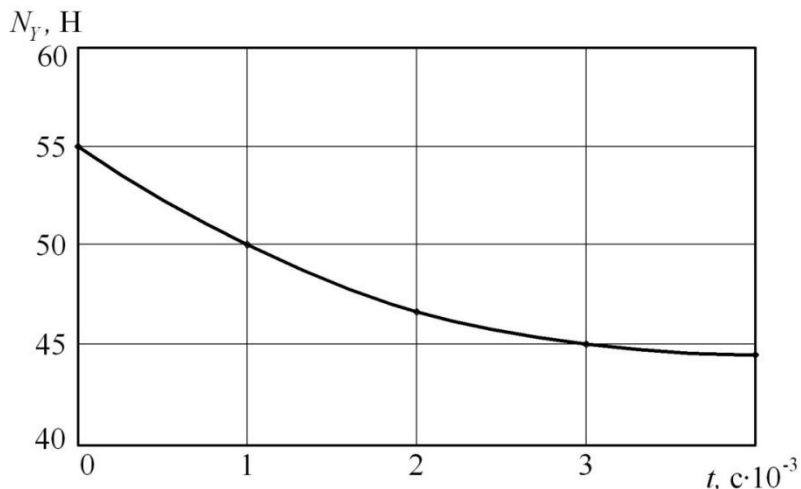
По результатам численного моделирования на ПЕОМ были построены графические зависимости (рис. 2) указанных составных сил от времени.



**Рис. 2.** Зависимость вертикальной  $N_x$  составной нормальной реакции от времени

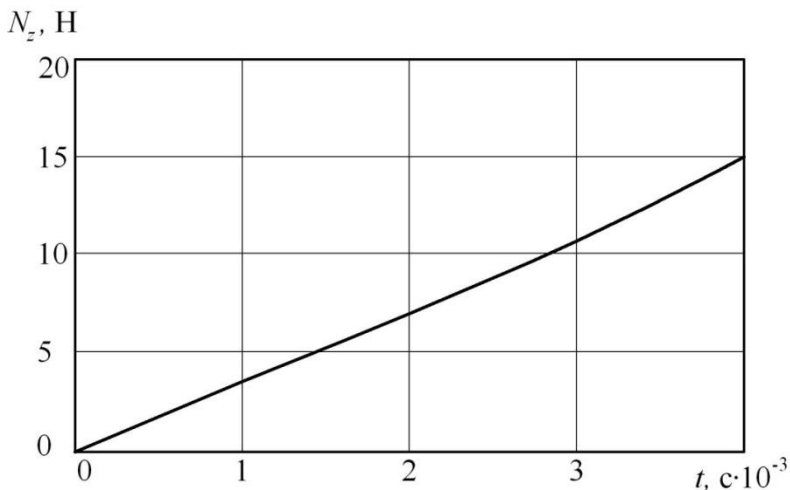
**Fig. 2.** The dependence of the vertical component  $N_x$  normal reaction times

Как видим из графиков (рис. 2) максимальные значения указанных составляющих нормальной реакции складывают  $N_{xmax} = 65$  Н,  $N_{ymax} = 55$  Н,  $N_{zmax} = 15$  Н. Эти значения были в дальнейшем использованы при моделировании силового взаимодействия очистительного элемента с головкой корнеплода сахарной свеклы.



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

**Fig. 3.** The dependence of the longitudinal and horizontal  $N_y$  part of the normal response times



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

**Fig. 4.** Cross-dependence  $N_z$  horizontal component of the normal reaction time

При этом, каждая из составляющих нормальной реакции будет действовать на головку корнеплода следующим образом: вертикальная составляющая  $N_y$  деформирует головку корнеплода и вдавливают корнеплода в грунт обеспечивая при этом стабильность контактного взаимодействия, но максимальные ее усилия не превышают допустимых усилий повреждения корнеплода; горизонтальные составляющие  $N_x$  и  $N_z$  оказывают вредное действие на процесс отделения ботвы выбивая корнеплоды в поперечном и продольном направлениях. Поэтому, знание аналитических зависимостей всех составляющих контактного усилия позволило обосновать конструктивные параметры отделителя ботвы исходя из условий повреждений и выбывания корнеплодов.

### Выводы

1. Впервые получены аналитические выражения для исследования динамического взаимодействия рабочего элемента нового отделителя ботвы сахарной свеклы.
2. Установлены значения контактных усилий возникающих при взаимодействии рабочего органа с головкой корнеплода.
3. Установленное максимальное значение пространственных составляющих контактного усилия, которые в последующем дали возможность аналитически оценивать такие показатели качества работы отделителя, как повреждения головок и их выбывания.
4. Полученные расчетные зависимости и значения нормальной реакции являются основой для построения математической модели динамического взаимодействия системы рабочих элементов с головкой корнеплода.

## Список литературы

1. Булгаков, В.М. Теория свеклоуборочных машин. Монография. Киев: Издательский центр НАУ, 2005. 245 с.
2. Василенко, П. М., Погорелый Л. В. Основы научных исследований (Механизация сельскохозяйственного производства). К.: Высшая 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.; Татьянко, Н. В. Свеклоуборочные машины: история, конструкция, теория, прогноз. 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, М. М. Повышение механико-технологической эффективности трудоемких процессов в свекловодстве: автореф. дис. на получение науч. степени докт. техн. наук.: спец. 05.20.01 “Механизация сельскохозяйственного производства” / М. М. Хелемендик. Тернополь.:ТПЗ, 1996. 48 с.
10. Хелемендик, Н. М. Исследование технологического процесса и рабочих органов для уборки сахарной свеклы в условиях Западной Степи УССР: 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. Волк, П. Ф. Агрофизические свойства корней сахарной свеклы в связи с механизацией уборки / П. Ф. Волк. В сб.: *Теория, конструкция и производство сельскохозяйственных машин*. Т. 2. Л.: Сельхозгиз, 1936. С. 269-284.
15. Механико-технологические свойства сельскохозяйственных материалов: практикум / [Войтюк Д. Г., Царенко О. М., Яцун С. С. и др.]; за ред. С. С. Яцуна. К.: Аграрное образование, 2000. 93 с.



Vladimir Bulgakov, Ivan Golovach, Andrij Boris

## **TRAFFIC STUDY OF THE ELEMENTS SINKING ROTARY SEPARATOR TOPPER ON THE HEAD OF ROOT CROPS**

Abstract

On the basis of the constructed mathematical model of the motion of the new separator cleaning element topper on the head of sugar beet roots and solutions to these expressions PEOM analytical dependence efforts in the point of contact. Constructed image changes depending on the components of efforts at the point of contact with the head of the working element root. Values of the components of efforts was used in the future for the power analysis of this interaction.

*Mathematical model, tops, roots, crown roots, the work item, the point of contact, the force interaction.*

Vladimir Bulgakov, Ivan Golovach, Andrij Boris

## **ROTORINIO CUKRINIŲ RUNKELIŲ LAPŲ ATSKYRIMO ĮRENGINIO KOPIJUOTUVO JUDĖJIMO, ŠAKNIAVAISIO GALVUTĖ, TYRIMAI**

Santrauka

Sudarytas naujo cukrinių runkelių lapų atskirimo elemento judėjimo, šakniavaisio galvutės paviršiumi, matematinis modelis. Naudojantis kompiuterine programa PEOM ir išsprendus gautas išraiškas, gautos analitinės priklausomybės apkrovoms, lapų atskirimo įrenginio ir šakniavaisio galvutės sąlyčio taške, nustatyti. Grafiniu būdu sudarytos reakcijų kitimo darbo elemento su šakniavaisiu sąlyčio taške priklausomybės.

Gautos normalinių reakcijų dedamųjų reikšmės buvo naudojamos tolimesnei veikiančių jėgų poveikio analizei.

*Matematinis modelis, lapai, šakniavaisis, šakniavaisio galvutė, darbinis elementas, sąlyčio taškas, jėgų sąveika.*