

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕЗА БОТВЫ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ КОПИРНО-РОТОРНЫМ ОТДЕЛИТЕЛЕМ

*Владимир Булгаков¹, Николай Березовой¹, Олег Черныш¹, Вадим Ярёмченко¹,
Николай Борис²*

*¹Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины
Украина, г. Киев, ул. Героев Оборона, 15*

*²Подольский государственный аграрно-технический университет
Украина, Хмельницкая обл., г. Каменец-Подольский, ул. Шевченко, 14
Vladimir Bulgakov¹, Nicholas Berezovoy¹, Oleg Chernysh¹, Vadim Yaremenko¹,
Nicholay Boris²*

*¹National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
Heroiv Oborony Str., 15, Kiev, Ukraine*

*²Podolsky State Agrarian Technical University
Shevchenko Str., 14, Kamenetz-Podolsky, Khmelnytsky region, Ukraine*

Аннотация. На основании построенной математической модели движения очистительного элемента нового отделителя ботвы по головке корнеплода сахарной свёклы и решения полученных выражений на ПЭВМ 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.

Ключевые слова: атематическая модель, ботва, корнеплод, головка корнеплода, рабочий элемент, точка контакта, силовое взаимодействие.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

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.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вопросам теоретических и экспериментальных исследований среза ботвы с головок корнеплодов сахарной свеклы посвящены многие труды П.М. Василенка, В.М. Булгакова, Л.В. Погорелого, П.В. Савича, Н.В. Татьяна и др. [1-6,14-21]. При этом ставится задача

исследовать и спроектировать свеклоуборочные машины, которые бы отвечали современным требованиям и нормам качества и сертификации [2]. Нами разработан новый рабочий орган для уборки ботвы – копирно-роторный отделитель ботвы, который удовлетворяет указанным требованиям [3].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Разработка методики аналитического исследования движения рабочего элемента копирно-роторного отделителя ботвы по головке корнеплода.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом данного исследования является движение рабочего элемента копирно-роторного отделителя ботвы сахарной свеклы по поверхности головки корнеплода.

Для проведения исследований используются основные положения теоретической механики и сопротивления материалов, а

также предыдущие исследования физико-механических свойств корнеплодов сахарной свеклы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

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: \bar{Q} – сила счесывания ботвы [8], 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 через данное положение точки

контакта; $\bar{F}_{тр}$ – 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 ; \bar{G} – сила веса рабочего элемента.

Дифференциальное уравнение движения точки контакта K по головке корнеплода в векторной форме будет иметь такой вид [8, 13]:

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

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

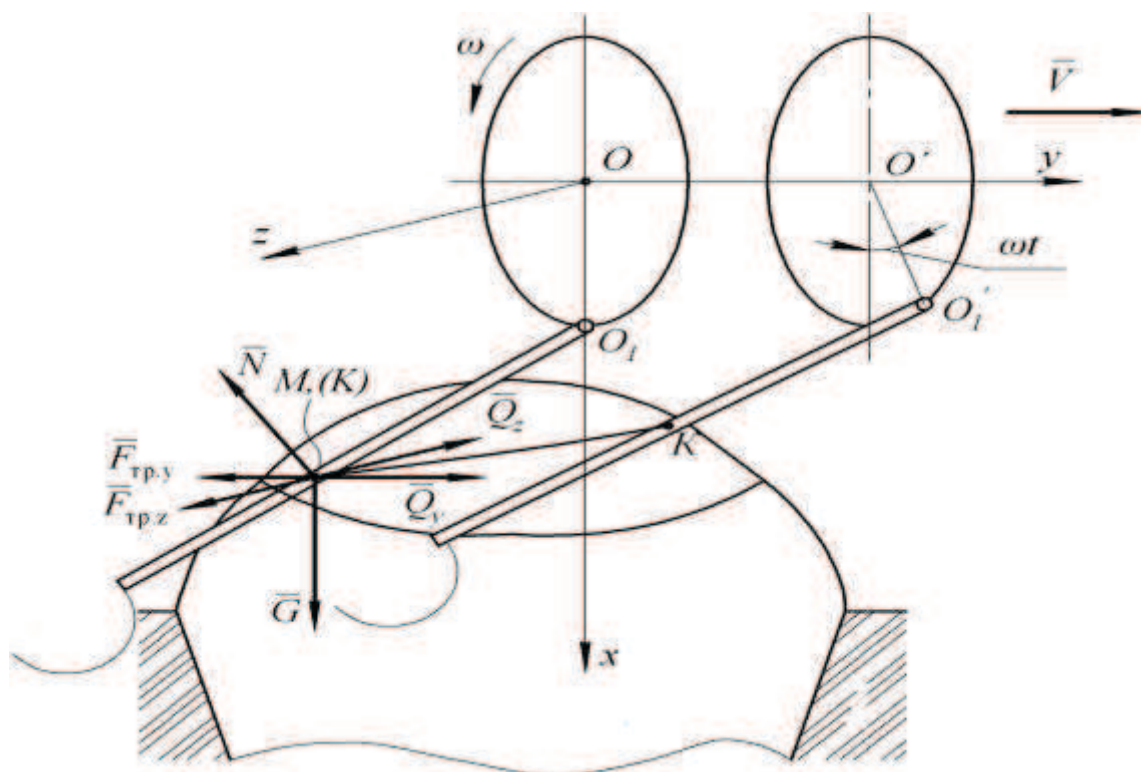


Рис. 1. Эквивалентная схема взаимодействия рабочего элемента отделителя ботвы с головкой корнеплода сахарной свёклы

Fig. 1. Equivalent chart of co-operation of working element of separator of tops with the head of root crop of sugar beet

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

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 [7, 8, 9, 10, 13, 14]:

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

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

Из уравнения (3) после алгебраических преобразований [9, 10], определена нормаль-

ная реакция на корнеплод сахарной свеклы при воздействии на него системы из двух рабочих элементов:

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_{mn} – 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:

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

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

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

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

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

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

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

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 составляющих сил от времени.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕЗА БОТВЫ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ КОПИРНО-РОТОРНЫМ ОТДЕЛИТЕЛЕМ

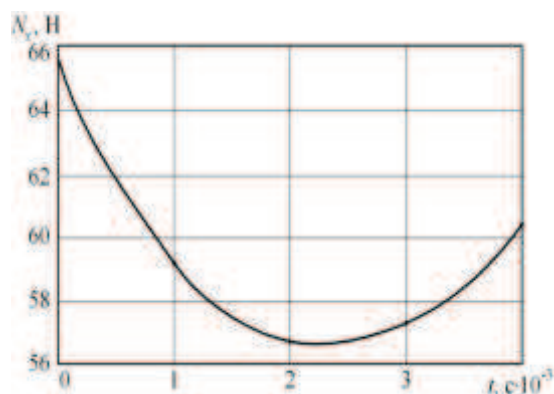


Рис. 2. Зависимость вертикальной составляющей нормальной реакции N_x от времени
Fig. 2. Dependence of vertical constituent of normal reaction of N_x on time

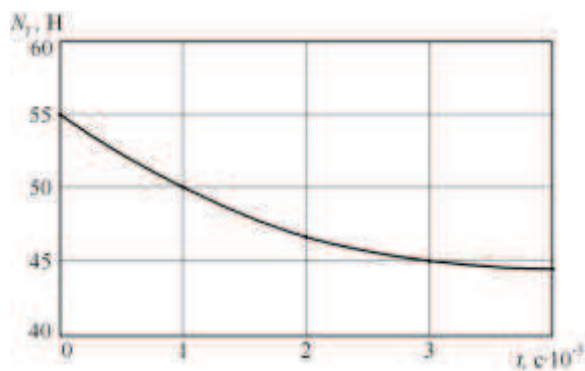


Рис. 3. Зависимость продольно-горизонтальной N_y составляющей нормальной реакции от времени
Fig. 3. Dependence of longitudinally-horizontal N_y of making normal reaction on time

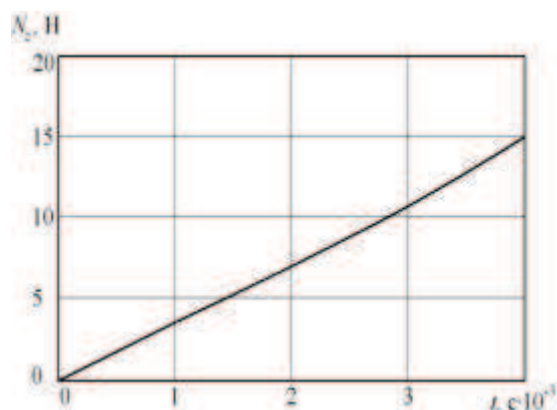


Рис. 4. Зависимость поперечно-горизонтальной составляющей нормальной реакции N_z от времени
Fig. 4. Dependence of поперечно-горизонтальной N_z of making normal reaction on time

Как видим из графиков (рис. 2-4) макси-

мальные значения указанных составляющих нормальной реакции N , составляют $N_{x\ max} = 65,0$ Н, $N_{y\ max} = 55,0$ Н, $N_{z\ max} = 15,0$ Н. Эти значения были в дальнейшем использованы при моделировании силового взаимодействия очистительного элемента с головкой корнеплода сахарной свеклы.

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

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Bulgakov V.M. 2005: Teoriya buryakozbiralnikh mashin. Monografiya / V. M. Bulgakov. – Kiiiv: Vidavnichiy tsentr NAU. – 245.
2. Sydorhuk O. 2007: Designing agricultural machinery, its conformity to international requirements of quality, standardization and certification. – MOTROL. Motorization And Power Industry in Agriculture. Volume 9 A. Lublin. Poland. – 207-211.
3. Patent. 2012: Patent na vinakhid 98917, Ukraina, MPK A 01D 23/02. Ochisnik golovok koreneplovdiv vid zalishkiv gichki / V. M. Bulgakov, A. M. Boris. – № u201113784; Zayavl. 23.11.2011; Opubl. 25.06.2012, Byul. №12.
4. Vasilenko P. M. 1984: Osnovy nauchnykh issledovaniy (Mekhanizatsiya selskokhozyaystvennogo proizvodstva) / P. M. Vasilenko, L. V Pogorelyy. – K.: Vishcha shkola. – 266.
5. Kompleksnaya mekhanizatsiya.1962: Kompleksnaya mekhanizatsiya proizvodstva

- sakharnoy svekly / [A. A. Vasilenko, P. T. Babiy, P. V. Savich i dr.]. – K. – 243.
6. Pogorelyy L. V. 2004: Svelkouborochnyye mashiny: istoriya, konstruktsiya, teoriya, prognoz / L. V. Pogorelyy, N. V. Tatyanko – K.: Feniks. – 232.
7. Filchakov P. F. 1974: Spravochnik po vysshey matematike / P. F. Filchakov. – K.: Nauchnaya mysl, 1974. – 743.
8. Targ S. M. 1986: Kratkiy kurs teoreticheskoy mekhaniki: uchebn. [dlya vyssh. tekhnich. zavedenyy] / S. M. Targ. – M.: Vyssh. shk. – 416.
9. Pisarenko G. S. 1975: Spravochnik po soprotivleniyu materialov / Pisarenko G. S., Yakovlev A. P., Matveyev V. V. – Kiyev: Naukova dumka, – 704.
10. Osnovnyye. 1988: Osnovnyye matematicheskiye formuly / [Vodneev V.T., Naumovich A.F., Naumovich N.F.]; pod red. Yu. S. Bogdanova. – Minsk.: Vysheyshaya shkola. – 255.
11. Khelemendik N. M. 1996: Povysheniye mekhaniko-tekhnologicheskoy effektivnosti trudoyemkikh protsessov v svelklovodstve: avtoref. dis. na soiskaniye nauch. stepeni dokt. tekhn. nauk.: spets. 05.20.01 “Mekhanizatsiya selskokhozyaystvennogo proizvodstva” / N. M. Khelemendik. – Ternopol.: TPI. – 48.
12. Khelemendik N. M. 1968: Issledovaniye tekhnologicheskogo protsessa i rabochikh organov dlya uborki sakharnoy svekly v usloviyakh Zapadnoy Stepi USSR: Diss. kand. tekhn. nauk.: 05.410 / Khelemendik Nikolay Mikhaylovich. – Voronezh. – 31 s.
13. Bat M. I. 1973: Teoreticheskaya mekhanika v primerakh i zadachakh: uch. posobiye / Bat M. I., Dzhanilidze G. Yu., Kelzon A. S. – M.: Nauka. – 488.
14. Butenin N. V. 1985: Kurs teoreticheskoy mekhaniki / Butenin N. V., Lunts Ya. L., Merkin D. R. T.2. – M.: Nauka. – 496.
15. VISKhOM. 1970: Fiziko-mekhanicheskiye svoystva rasteniy, pochv i udobreniy: metody issledovaniya, pribory, kharakteristiki. – M.: Kolos. – 417.
16. Vovk P. F. 1936: Agrofizicheskiye svoystva korney sakharnoy svekly v svyazi s mekhanizatsiyey uborki / P. F. Vovk. // V sb.: Teoriya, konstruktsiya i proizvodstvo selskokhozyaystvennykh mashin. T. 2. – L.: Selkhozgiz. – 269-284.
17. Mekhaniko-tekhnologicheskkiye 2000: svoystva selskokhozyaystvennykh materialov: praktikum / [Voytyuk D. G., Tsarenko O.M., Yatsun S. S. i dr.]; za red. S. S. Yatsuna. – K.: Agrarnoye obrazovaniye. – 93.
18. Bulgakov V.M. 2011: Teoriya robochogo protsesu vidalennya gichki z koreneplodiv tsukrovikh buryakiv / V. M. Bulgakov, A. M. Boris // Naukoviy visnik natsionalnogo universitetu bioresursiv i prirodokoristuvannya Ukraini. – K. – Vip. 166, ch. 1. – 350.
19. Gulyayev V. I. 1989: Kolebaniya sistem tverdyykh i deformiruyemykh tel pri slozhnom dvizhenii / V.I. Gulyayev, P. P. Lizunov // – K.: Vishcha shkola. – 197.
20. Bulgakov V. 2004: Design of agricultural machinery in Ukraine, its conformity to the international requirements of quality, standardizations and certification. – MOTROL. Motorization and power industry in agriculture. Volume VI. Lublin. Poland. – 33-39.
21. Bulgakov V., Nowak J., Przystupa W. 2004: A mathematical model of drum-type sugar beet tops cleaner. – Polish academy of sciences branch in Lublin. Teka commission of motorization and energetics in agriculture. Volume IV. Lublin. Poland. – 40-49.

THEORETICAL STUDY OF CUT OF PLANT TOPS SUGAR BEET WITH COPYING-ROTOR SEPARATOR

Summary. On basis of constructed mathematical model of motion of new separator cleaning element topper on head of sugar beet and solutions derived forms on PC based analytical dependence of efforts in indicated point of contact. Constructed graphic dependence changes of components of normal reaction at point of contact of working element with the head root. Values of components of normal reaction was used in future for power analysis of this interaction.

Key words: mathematical model, tops, root, root head, working element, system of working element, point of contact, interaction strength.