

УДК 631.356.22

## АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ГОЛОВОК КОРЕНЕПЛОДІВ ПАСИВНИМ НОЖЕМ

**В. Барановський**, канд. техн. наук,  
*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя*  
**В. Теслюк**, д-р с.-г. наук, **І. Сторожук**,  
*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*Наведено результати теоретичного аналізу процесу відокремлення залишків гички з головок коренеплодів пасивним підпружиненим ножем. Побудовано математичну модель, яка характеризує взаємозв'язок зміни сили різання головок коренеплодів пасивним ножем залежно від параметрів процесу.*

**Ключові слова:** *головка коренеплодів, залишки гички, пасивний ніж, сила різання.*

**Актуальність проблеми.** У всесвітній практиці гичку кормових буряків збирають машинами роздільного збирання, використовуючи принцип зрізування гички на корені. Найбільш розповсюджений спосіб – роздільний, який передбачає використання універсальні машини для збирання гички як кормових, так і цукрових буряків.

Загальні властивості гички та коренеплодів, розміщення їх головок відносно поверхні ґрунту тощо в значній мірі впливають на процес відокремлення залишків [1]. Враховуючи специфічні механіко-технологічні властивості зв'язку гички з коренеплодами, можна зробити висновок, що технологічний процес збирання гички доцільно здійснювати комбінованим (двостадійним) способом, який включає зрізування основного масиву гички з наступним видаленням залишків гички на головках коренеплодів дообрізчиком типу «пасивний копір-пасивний ніж» за принципом різання з ковзанням леза ножа вдовж головки коренеплодів [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Теоретичні дослідження процесу зрізування гички коренеплодів [3-5 та ін.] присвячені в основному дослідженню загальних принципів процесу обрізування головок коренеплодів способом рублення. Відсутність теоретичних узагальнень процесу різання з проковзуванням леза ножа вдовж головки коренеплодів зумовила проведення даних досліджень.

**Мета дослідження** – подальше удосконалення методології оптимізації конструкційно-кінематичних параметрів і режимів роботи робочих органів для відокремлення залишків гички з головок коренеплодів.

**Результати дослідження.** На основі аналізу літературних джерел і

враховуючи нову конструкцію розробленого пасивного ножа дообрізка головок коренеплодів від залишків гички розглянемо процес різання лезом, яке в більшості випадків застосовується в гичкозбиральних машинах. Ніж, рухаючись поступально напрямку руху гичкозбиральної машини, лезом різальної кромки обрізує головку коренеплодів на заданій висоті зрізу.

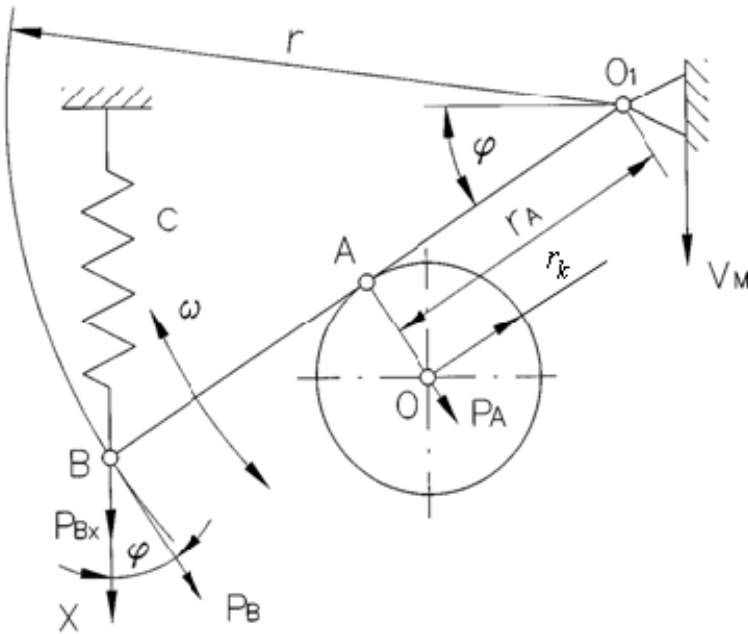


Рисунок 1 – Розрахункова схема процесу різання головок коренеплодів плоским підпружиненим ножом

Для проведення дослідження різання підпружиненим ножом головки коренеплодів складено еквівалентну схему процесу взаємодії леза ножа з поверхнею головки коренеплодів (рис. 1).

Розглянемо аналітично процес обрізування головки коренеплоду від залишків гички. При цьому вважаємо, що основна частина гички з головок коренеплодів попередньо зрізана робочими органами гичкозбиральної машини, тобто змодельюємо коренеплід, як нерухоме тверде тіло, що умовно закріплене в ґрунті, головка якого являє собою півсферу діаметром  $D_k$ .

У процесі поступального руху гичкозбиральної машини, лезо ножа зрізує головку коренеплодів, при цьому під час різання головки лезо ножа відхиляється на вертикальному пальці шарніра до упора, виконуючи різання методом ковзання. Після зрізування головки коренеплодів ніж завдяки регулювальній пружині повертається в початкове положення.

Вибираємо вісь  $X$  з початком в точці  $B$  (рис. 1), яка відповідає початковому моменту дотику ножа до коренеплоду радіусом  $r_k$  в точці  $A$  і направляємо її по ходу машини з швидкістю  $V_M$ .

Розглянемо складову зусилля взаємодії коренеплоду з ножем  $P_{Bx} = P_B \cos \varphi$ , яка співпадає з напрямком вісі  $X$ , де  $\varphi$  – кут повороту ножа, град.

Тоді координата  $X$  зусилля різання  $P_{Bx}$  в довільний момент часу повністю визначить положення системи і може бути прийнята за узагальнену координату.

Кінетична енергія  $T_c$  системи дообрізчика складається з суми кінетичної енергії поступального руху ножа  $T_V$  дообрізчика за ходом машини і кінетичної енергії підпружиненого ножа  $T_r$  від його кута повороту:

$$T_c = T_V + T_r. \quad (1)$$

Кінетичної енергія поступального руху ножа  $T_V$  визначається за формулою [6]

$$T_c = \frac{m_n V_a^2}{2} = \frac{P_{Bx}}{2g} \left( \frac{dX}{dt} \right)^2, \quad (2)$$

де  $m_n$  – маса ножа, кг;  $P_{Bx}$  – зусилля взаємодії коренеплоду з ножем, Н;  $X$  – переміщення ножа, м;  $V_a$  – абсолютна лінійна швидкість ножа, м/с;  $g$  – прискорення вільного падіння ножа, м/с<sup>2</sup>.

Кінетична енергія ножа  $T_r$  від його кута повороту визначається за формулою [6]

$$T_r = \frac{I_n \omega_n^2}{2} = \frac{I_n}{2} \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2, \quad (3)$$

де  $I_n$  – момент інерції плоского ножа відносно осі повороту, кг м<sup>2</sup>;  $\varphi$  – кут повороту ножа, град.;  $\omega_n$  – кутова швидкість повороту ножа, рад/с.

Момент інерції ножа  $I_n$  відносно осі повороту, який виконано у формі прямокутної пластини, визначається за формулою [7]

$$I_n = \frac{P_n r^2}{2g}, \quad (4)$$

де  $P_n$  – сила ваги ножа, Н;  $r$  – довжина леза ножа, м.

Тоді, підставивши (2-4) у рівняння (1) одержимо залежність для визначення кінетичної енергії  $T_c$  системи

$$T_c = \frac{P_{Bx}}{2g} \left( \frac{dX}{dt} \right)^2 + \frac{I_n}{2} \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = \frac{P_B \cos \varphi}{2g} \left( \frac{dX}{dt} \right)^2 + \frac{P_n r^2}{4g} \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2. \quad (5)$$

Під час повороту ножа абсолютна лінійна швидкість  $V_a$  точки  $B$  за ходом машини дорівнює

$$V_a = \frac{dX}{dt} = \omega_n r \cos \varphi, \quad (6)$$

звідки

$$\omega_n = \frac{dX}{dt} \frac{1}{r \cos \varphi}; \quad \omega_n^2 = \left( \frac{dX}{dt} \right)^2 \frac{1}{r^2 \cos^2 \varphi}. \quad (7)$$

Підставивши (7) в (5), одержимо:

$$\begin{aligned} T_c &= \frac{P_B \cos \varphi}{2g} \left( \frac{dX}{dt} \right)^2 + \frac{P_n r^2}{4gr^2 \cos^2 \varphi} \left( \frac{dX}{dt} \right)^2 = \\ &= \frac{1}{2g} \left( P_B \cos \varphi + \frac{0,5P_n}{\cos^2 \varphi} \right) \left( \frac{dX}{dt} \right)^2. \end{aligned} \quad (8)$$

У точці  $B$  на ніж діє зусилля, яке визначається з рівності:

$$P_B r = P_A r_A. \quad (9)$$

де  $r_A$  - радіус точки контакту ножа з головкою коренеплоду, м.

Звідки

$$P_B = \frac{P_A r_A}{r}. \quad (10)$$

Тоді, враховуючи (10) складова зусилля взаємодії ножа з коренеплодом за ходом машини дорівнює:

$$P_{Bx} = P_B \cos \varphi = \frac{P_A r_A}{r} \cos \varphi. \quad (11)$$

Отже, кінцевий вираз кінетичної енергії системи через узагальнену швидкість з урахуванням (5, 8, 11) набуде вигляду:

$$T_c = \frac{1}{2g} \left( P_{Bx} + \frac{P_n}{2 \cos^2 \varphi} \right) \left( \frac{dX}{dt} \right)^2 = \frac{1}{2g} \left( \frac{P_A r_A}{r} \cos \varphi + \frac{P_n}{2 \cos^2 \varphi} \right) \left( \frac{dX}{dt} \right)^2. \quad (12)$$

Для визначення узагальненого зусилля надамо системі можливе переміщення  $\delta_X$  і складемо елементарну роботу зусиль, що задаються.

Елементарна робота ножа  $\delta A$  складається з роботи зусилля різання ножа, приведеного в точку  $B$  і роботи зусилля пружності пружини підвісу ножа [7]:

$$\delta A = P_{Bx} \delta_X - c(X + \Delta) \delta_X = (P_{Bx} - cX - c\Delta) \delta_X, \quad (13)$$

де  $\delta_X$  - можливе переміщення ножа відносно осі  $OX$ , м;  $c$  - узагальнене зусилля пружності, Н;  $\Delta$  - статичне видовження пружини, м.

Враховуючи, що в положенні рівноваги  $c\Delta = P_{Bx} \delta_X$ , тоді можна записати (13) у наступному (кінцевому) вигляді:

$$\delta A = -cX\delta_X. \quad (14)$$

Узагальненим зусиллям є коефіцієнт у виразі (14) для визначення елементарної роботи  $\delta A$ , яка виникає під час можливого переміщення ножа  $\delta_X$ :

$$Q = -cX. \quad (15)$$

Складемо рівняння Лагранжа другого роду.

Загальний вигляд рівняння Лагранжа другого роду визначається кінетичною енергією ножа від узагальнених координат і абсолютної швидкості та силою, яка діє на нього [8]

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i, \quad (16)$$

де  $q_i, \dot{q}_i, Q_i$  – відповідно узагальнені координати, швидкість переміщення ножа і узагальнююча сумарна сила, яка діє на нього.

У нашому випадку, враховуючи (12), кінцевий вигляд рівняння Лагранжа другого роду має такий вигляд

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{X}} = \left( P_{Bx} + \frac{F_n}{2 \cos^2 \varphi} \right) \frac{1}{g} \frac{dX}{dt}; \quad \frac{\partial T}{\partial X} = 0. \quad (17)$$

Тоді

$$\left( P_{Bx} + \frac{F_n}{2 \cos^2 \varphi} \right) \frac{1}{g} \frac{d^2 X}{dt^2} = -cX, \quad (18)$$

або

$$\frac{d^2 X}{dt^2} + \frac{cg}{P_{Bx} + \frac{F_n}{2 \cos^2 \varphi}} X = 0. \quad (19)$$

Рішення однорідного лінійного диференціального рівняння (19) з постійними коефіцієнтами має вигляд [9]

$$X = \alpha \sin(kt + \beta), \quad (20)$$

де  $\alpha, \beta$  – довільні постійні інтегрування;  $k$  – частота коливання ножа.

Частоту коливання ножа  $k$  знаходимо з рівності

$$k^2 = \frac{cg}{P_{Bx} + \frac{P_n}{2 \cos^2 \varphi}} = \frac{cg}{\frac{P_A r_A}{r} \cos \varphi + \frac{P_n}{2 \cos^2 \varphi}}, \quad (21)$$

або

$$k = \sqrt{\frac{cg}{\frac{P_A r_A}{r} \cos \varphi + \frac{P_n}{2 \cos^2 \varphi}}}. \quad (22)$$

Довільні постійні інтегрування  $\alpha$  і  $\beta$  визначаються з початкових умов:

$$t = 0; X_0 = 0; \frac{dX_0}{dt} = V_M. \quad (23)$$

Підставивши значення (23) в (20), знаходимо:

$$0 = \alpha \sin \beta, \text{ або } \beta = 0. \quad (24)$$

Виходячи з рівняння (20), одержимо:

$$\frac{dX}{dt} = k\alpha \cos kt, \quad (25)$$

або у початковий момент різання при  $t = 0$

$$V_M = k\alpha, \text{ або } \alpha = V_M / k. \quad (26)$$

Період вільних коливань визначаємо за формулою:

$$T = \frac{2\pi}{k} = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{P_A r_A}{r} \cos \varphi + \frac{F_n}{2 \cos^2 \varphi}}{cg}}. \quad (27)$$

Якщо внести значення довільних постійних в рівняння (20), отримаємо залежність величини переміщення ножа дообрізка від зусилля різання при виконанні процесу дообрізування головки коренеплідів від гички плоским підпружиненим ножом:

$$X = \frac{V_M}{k} \sin kt = \frac{V_M}{\sqrt{\frac{\frac{P_A r_A}{r} \cos \varphi + \frac{P_n}{2 \cos^2 \varphi}}{cg}}} \sin \left( t \sqrt{\frac{cg}{\frac{\frac{P_A r_A}{r} \cos \varphi + \frac{P_n}{2 \cos^2 \varphi}}{cg}}} \right). \quad (28)$$

Здійснивши математичне перетворення формули (28), отримаємо:

$$X \sqrt{\frac{cg}{\frac{\frac{P_A r_A}{r} \cos \varphi + \frac{P_n}{2 \cos^2 \varphi}}{cg}}} = V_M \sin \left( t \sqrt{\frac{cg}{\frac{\frac{P_A r_A}{r} \cos \varphi + \frac{P_n}{2 \cos^2 \varphi}}{cg}}} \right), \quad (29)$$

або

$$\frac{1}{V_M} = \frac{\sin \left( t \sqrt{\frac{cg}{\frac{\frac{P_A r_A}{r} \cos \varphi + \frac{P_n}{2 \cos^2 \varphi}}{cg}}} \right)}{X \sqrt{\frac{cg}{\frac{\frac{P_A r_A}{r} \cos \varphi + \frac{P_n}{2 \cos^2 \varphi}}{cg}}}}, \quad (30)$$

або

$$\sin \left( t \sqrt{\frac{cg}{\frac{P_A r_A}{r} \cos \varphi + \frac{P_n}{2 \cos^2 \varphi}}} \right) = \frac{X \sqrt{\frac{P_A r_A}{r} \cos \varphi + \frac{P_n}{2 \cos^2 \varphi}}}{V_M}. \quad (31)$$

Розклавши синус в ряд Тейлора [9] і обмежившись першими двома членами ряду та розв'язавши залежність відносно  $1/V_M$  одержимо:

$$\frac{1}{V_M} = \frac{t \sqrt{\frac{cg}{\frac{P_A r_A}{r} \cos \varphi + \frac{P_n}{2 \cos^2 \varphi}}} - \frac{t^3 \sqrt{\left( \frac{cg}{\frac{P_A r_A}{r} \cos \varphi + \frac{P_n}{2 \cos^2 \varphi}} \right)^3}}{3!}}{X \sqrt{\frac{cg}{\frac{P_A r_A}{r} \cos \varphi + \frac{P_n}{2 \cos^2 \varphi}}}}. \quad (32)$$

Виконавши подальші математичні перетворення залежності (30) отримаємо:

$$\frac{1}{V_M} = \frac{t}{X} - \frac{t^3 \left( \frac{cg}{\frac{P_A r_A}{r} \cos \varphi + \frac{P_n}{2 \cos^2 \varphi}} \right)}{6X}. \quad (33)$$

Розв'язавши рівняння (33) відносно  $P_A$  одержимо:

$$P_A = \frac{r}{2r_A \cos \varphi} \left[ \frac{cgt^3 V_M}{3} - \frac{P_n}{\cos^2 \varphi} \right]. \quad (34)$$

Оскільки час  $t = X / V_M$ , то залежність (34) матиме вигляд:

$$P_A = \frac{r}{2r_A \cos \varphi} \left( \frac{cgX^3}{3V_M^2} - \frac{P_n}{\cos^2 \varphi} \right), \quad (35)$$

або

$$P_A = \frac{rg}{2r_A \cos \varphi} \left( \frac{cX^3}{3V_M^2} - \frac{m_n}{\cos^2 \varphi} \right), \quad (36)$$

При початкових умовах  $r = 0,3$  м (довжина ножа),  $r_A = 0,15$  м (довжина ножа до точки контакту з коренеплодом),  $\varphi = 60^\circ$  (кут повороту ножа

обмежений упорами),  $V_M = 1,5$  м/с (швидкість машини),  $c = 70$  (жорсткість пружини), згідно з формулою (36) побудовано залежність зміни сили різання як функції  $P_A = f(X, m_n)$ , яку наведено на рисунку 2.

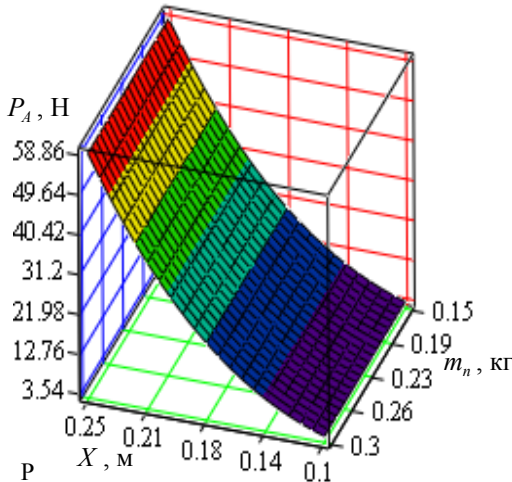


Рисунок 2 – Залежність зміни сили різання від переміщення та маси ножа,  $P_A = f(X, m_n)$

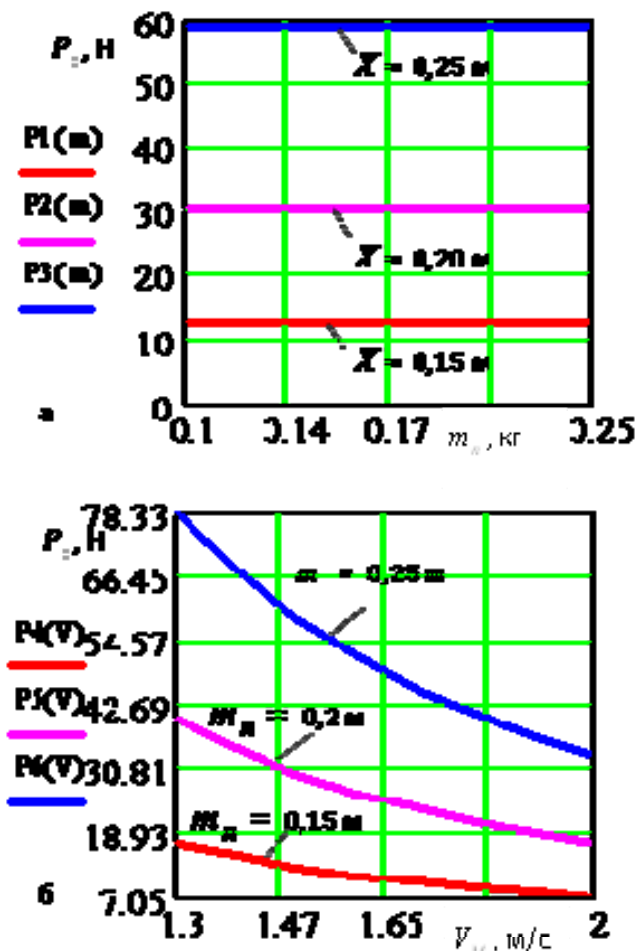
На рисунку 3. наведено залежність зміни сили різання  $P_A$  від поступальної швидкості машини  $V_M$ , тобто  $P_A = f(V_M)$  при постійних значеннях інших складових залежності (36).

Аналіз наведених графічних залежностей показує, що сила різання  $P_A$  збільшується прямо пропорційно збільшенню переміщення ножа  $X$  і практично не залежить від зміни маси ножа  $m_n$  в межах від 0,1 до 0,25 кг при  $V_M = \text{const}$  (рис. 2, рис. 3а), при цьому залежно від переміщення ножа  $X$  знаходиться в межах 15-60 Н.

Але подальше графічне моделювання залежності зміни сили різання  $P_A$  від маси ножа  $m_n$ , коли  $m_n > 0,5$  кг, показало, що зміна  $P_A$  залежно від  $m_n$  також носить прямо пропорційний характер.

Залежно від поступальної швидкості руху дообрізчика, зміна сили різання  $P_A$  носить параболічний характер (рис. 3б) і зі збільшенням швидкості руху від 1,3 до 2,0 м/с зменшується приблизно в 2 рази, а зі збільшення маси ножа від 0,15 до 0,25 кг збільшується приблизно в 4 рази.





*a* – від зміни маси ножа  $m_n$ ;

*б* - від зміни поступальної швидкості руху проріджувача  $V_M$

Рисунок 3 – Залежність сили різання  $P_A$

**Висновки.** Наведена залежність (36) характеризує силу різання головок коренеплодів і може бути використана в процесі розроблення та обґрунтування конструкційно-кінематичних параметрів і режимів роботи гичкозбиральних машин.

### **Література**

1. Погорелый Л.В. Свеклоуборочные машины: история, конструкция, теория, прогноз / Л.В. Погорелый, М.В. Татьяна. – К. : Феникс, 2004. – 232 с.
2. Мишин М.А. Анализ конструкций режущих аппаратов к свеклоуборочным машинам / М.А. Мишин, И.П. Бабко, Э.Б. Борщевская // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1992. – № 4. – С. 21-24.
3. Мартиненко В.Я. Гичкозбиральні машини / Мартиненко В.Я. – Тернопіль : ТОВ “Поліграфіст”, 1997. – 108 с.
4. Резник Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов / Резник Н.Е. – М. : Машиностроение, 1975. – 305 с.
5. Татьяна Н.В. Исследование и усовершенствование аппарата для срезания ботвы с корней сахарной свеклы : автореф. дисс. на соискание научн. степени канд. техн. наук : спец. 05.20.11 “Механизация сельскохозяйственного производства” / Н.В. Татьяна – Харьков, 1967. – 28 с.
6. Айзерман А.А. Классическая механика / А.А. Айзерман. – Главн ред. физ.-мат. лит.– М. : Наука. – 1974. – 368 с.
7. Добронравов В.В. Курс теоретической механики : [учебник для вузов, 3-е изд., перераб.] / В.В. Добронравов, Н.Н. Никитин, А.Л. Дворников. – М. : Высшая школа, 1974. – 528 с.
8. Яблонский А.А. Курс теоретической механики : [учебник для вузов, часть 2, 4-е изд.] / Яблонский А.А.. – М. : Высшая школа, 1971. – 347 с.
9. Бутенин Н.В. Курс теоретической механики : [учебник, том II. : Динамика, 3-е изд., исправл.] / Н.В. Бутенин, Я.Л. Лунц, Д.Р. Меркин. – М. : Наука, 1985. – 496 с.

### **Аннотація**

*Приведены результаты теоретического анализа процесса отделения остатков ботвы с головок корнеплодов пассивным подпружиненным ножом. Построено математическую модель, которая характеризует взаимосвязь изменения силы резания головок корнеплодов пассивным ножом в зависимости от параметров процесса.*

### **Summary**

*The results of theoretical analysis of process of separation of root crops tops tailings by a passive spring assisted knife are cited. A mathematical model characterizing relationship of cutting force change by a passive knife depending on the process parameters is built.*