

Головач І. В.

Національний  
університет  
біоресурсів і  
природокористування  
України

Пришляк В. М.

Вінницький  
національний  
аграрний  
університет

УДК 631.356.2

## ДИФЕРЕНЦІАЛЬНЕ РІВНЯННЯ РУХУ КОРЕНЕПЛОДУ ПРИ БЕЗПОСЕРЕДНЬОМУ ВИЛУЧЕННІ З ҐРУНТУ

Построена расчетная математическая модель процесса выкапывания корнеплодов сахарной свеклы. При этом корнеплод сахарной свеклы моделируется как твердое тело, закрепленное в почве, а выкапывающий рабочий орган, двигаясь поступательно, захватывает его и извлекает из почвы.

The settlement mathematical model of process of vibrating excavation of root crops of sugar beet is constructed. Thus the root crop of sugar beet is modelled as a firm body, and the digging out body makes fluctuations in is longitudinal a vertical plane.

**Вступ.** Розробка нових технологічних процесів та вдосконалених робочих органів для викопування корнеплодів з ґрунту є актуальною задачею галузі буряківництва, оскільки саме збирання корнеплодів є однією з найбільш трудомістких та енергомістких його операцій. Застосування при викопуванні корнеплодів з ґрунту зусиль обумовлює найменші затрати енергії на руйнування ґрунту, що оточує корнеплоди, і сприяє меншим їх втратам та пошкодженню при збиранні. Тому саме цей технологічний процес потребує докладного аналітичного дослідження та подальшої розробки і впровадження вдосконалених викопуючих робочих органів.

### Аналіз досліджень і публікацій.

Ґрунтовні аналітичні дослідження процесу викопування корнеплодів приведені у працях [1-5], проте математичної моделі безпосереднього вилучення корнеплоду з ґрунту тут не приведено.

Тому виникає необхідність окремо розглянути динамічну систему корнеплід – викопуючий робочий орган з метою дослідження процесу безпосереднього вилучення з ґрунту як твердого тіла, що відбувається під дією лемішного викопуючого робочого органу, що здійснює поступальний рух.

**Мета дослідження.** Побудувати математичну модель безпосереднього вилучення корнеплодів з ґрунту.

**Предмет дослідження.** Перейдемо до докладного теоретичного дослідження першого етапу вилучення корнеплоду, коли корнеплід

ще міцно зв'язаний з ґрунтом. Для цього побудуємо насамперед еквівалентну схему взаємодії робочих площин (клинів) викопуючого робочого органу з тілом корнеплоду цукрового буряку (рис. 1). На цій схемі показані всі сили, що діють на корнеплід, а також осі просторової декартової системи координат  $Oxyz$ .

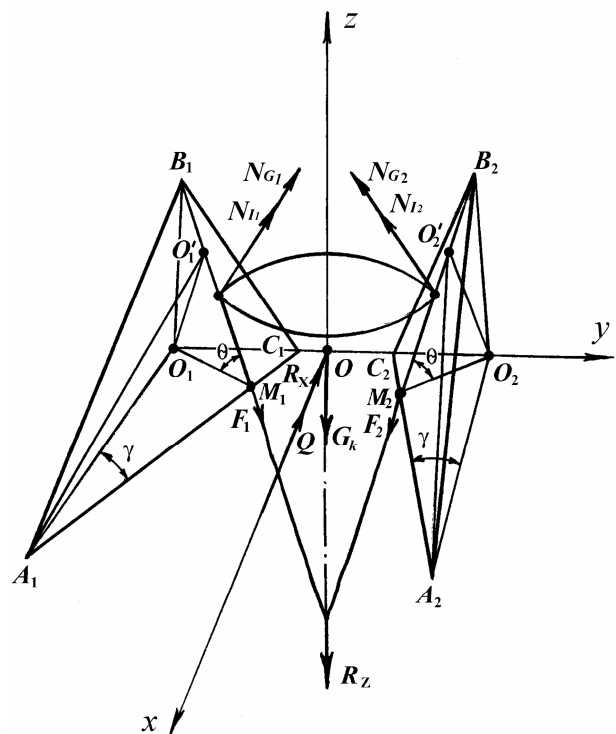
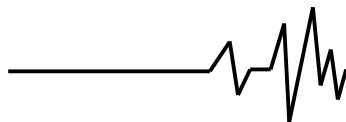


Рис. 1. Силова взаємодія корнеплоду з клинами лемішного робочого органу



Складемо диференціальне рівняння руху коренеплоду. У векторній формі воно має такий вигляд:

$$m\bar{a} = \bar{N}_{G1} + \bar{N}_{G2} + \bar{N}_{I1} + \bar{N}_{I2} + \bar{Q} + \bar{R}_x + \bar{R}_z + \bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \bar{G}_k, \quad (1)$$

де  $m$  – маса коренеплоду;  $a$  – прискорення вилучення коренеплоду з ґрунту;  $\bar{R}_x, \bar{R}_z$  – відповідно горизонтальна і вертикальна складові сили опору  $\bar{R}$  зчеплення коренеплоду з ґрунтом;  $\bar{F}_1, \bar{F}_2$  – сумарні сили тертя, які виникають при русі коренеплоду по робочій поверхні клинів  $A_1B_1C_1$  і  $A_2B_2C_2$  відповідно;  $G_k$  – вага коренеплоду.

Очевидно, що:

$$\begin{aligned} F_1 &= f_1(N_{G1} + N_{I1}), \\ F_2 &= f_1(N_{G2} + N_{I2}), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $f_1$  – коефіцієнт тертя бокової поверхні коренеплоду по поверхні клинів.

Запишемо диференціальне рівняння (1) у декартовій системі координат  $Oxyz$ . Слід зазначити, що оскільки складові нормальних реакцій робочих поверхонь клинів  $A_1B_1C_1$  і  $A_2B_2C_2$  на вісь  $Oy$  рівні за величиною і протилежно напрямлені, то вилучення коренеплоду з ґрунту відбувається фактично у площині  $xOz$ , а тому диференціальне рівняння руху коренеплоду (1) у векторній формі зводиться до системи двох диференціальних рівнянь такого вигляду:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = N_{G1x} + N_{G2x} + N_{I1x} + N_{I2x} - Q - R_x + F_{1x} + F_{2x}, \\ m\ddot{z} = N_{G1z} + N_{G2z} + N_{I1z} + N_{I2z} - R_z - F_{1z} - F_{2z} - G_k. \end{cases} \quad (3)$$

Визначимо проєкції сил, що входять у дану систему диференціальних рівнянь. Проєкції нормальних реакцій поверхонь клинів  $A_1B_1C_1$  і  $A_2B_2C_2$  на осі  $x$  і  $z$  будуть відповідно дорівнювати:

$$N_{G1x} = N_{G2x} = \frac{N_{G1} \operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}},$$

або

$$N_{G1x} = N_{G2x} = \frac{G \operatorname{tg} \gamma}{2(\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma) \sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}}. \quad (4)$$

$$N_{G1z} = N_{G2z} = \frac{N_{G1} \operatorname{tg} \beta}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}},$$

або

$$N_{G1z} = N_{G2z} = \frac{G \operatorname{tg} \beta}{2(\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma) \sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}}. \quad (5)$$

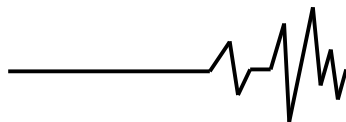
Аналогічно знаходимо:

$$N_{I1x} = N_{I2x} = \frac{ab\gamma_{об.} V^2}{g} \frac{\sin \delta \sin \gamma \operatorname{tg} \gamma}{(\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma) \sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}}, \quad (6)$$

$$N_{I1z} = N_{I2z} = \frac{ab\gamma_{об.} V^2}{g} \frac{\sin \delta \sin \gamma \operatorname{tg} \beta}{(\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma) \sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}}. \quad (7)$$

Оскільки сили тертя напрямлені протилежно напрямкам траєкторій відносного руху пласта ґрунту та коренеплоду по поверхнях клинів  $A_1B_1C_1$  та  $A_2B_2C_2$

(паралельно прямим  $A_1O'_1$  та  $A_2O'_2$ ), то їх проєкції на осі координат  $Ox, Oy, Oz$  будуть дорівнювати:



$$\begin{aligned}
 F_{1x} &= F_1(\cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \cos \delta), \\
 F_{1y} &= -F_1 \cos \gamma \sin \gamma(1 - \cos \delta), \\
 F_{1z} &= -F_1 \sin \gamma \sin \delta, \\
 F_{2x} &= F_2(\cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \cos \delta), \\
 F_{2y} &= F_2 \cos \gamma \sin \gamma(1 - \cos \delta), \\
 F_{2z} &= -F_2 \sin \gamma \sin \delta.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Далі зробимо такі позначення:

$$\begin{aligned}
 \bar{N}_1 &= \bar{N}_{G1} + \bar{N}_{I1}, & \bar{N}_2 &= \bar{N}_{G2} + \bar{N}_{I2}, \\
 \bar{F}_1 &= \bar{F}_{G1} + \bar{F}_{I1}, & \bar{F}_2 &= \bar{F}_{G2} + \bar{F}_{I2}.
 \end{aligned}$$

Тоді:

$$\begin{aligned}
 &\frac{\operatorname{tg} \beta}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} \left[ \frac{G}{\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma} + \frac{2ab\gamma_{oo} V^2 \sin \delta \sin \gamma}{g(\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma)} \right] - \\
 &- \frac{Gf_1 \sin \delta \sin \gamma}{\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma} - \frac{2ab\gamma_{oo} V^2 \sin^2 \delta \sin^2 \gamma f_1}{g(\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma)} - G_k > R_z.
 \end{aligned} \tag{11}$$

При виконанні умови (11) відбудеться вилучення коренеплоду з ґрунту. Ліва частина виразу (11) являє собою вираз для сили вилучення коренеплоду в напрямку осі  $Oz$  при умові безпосереднього контакту коренеплоду з лемешами.

Якщо двічі проінтегрувати систему диференціальних рівнянь (8), то отримуємо значення проєкцій швидкості на осі  $Ox$  та  $Oz$  і переміщення коренеплоду в напрямку вказаних осей як функцій від часу  $t$ .

Перші інтеграли будуть дорівнювати:

$$\dot{x} = \frac{1}{m}(N_{1x} + N_{2x} - R_x + F_{1x} + F_{2x} - Q)t + C_1, \tag{12}$$

$$\dot{z} = \frac{1}{m}(N_{1z} + N_{2z} - R_z - F_{1z} - F_{2z} - G_k)t + L_1,$$

другі інтеграли дорівнюють:

$$x = \frac{1}{m}(N_{1x} + N_{2x} - R_x + F_{1x} + F_{2x} - Q) \frac{t^2}{2} + C_1 t + C_2,$$

$$z = \frac{1}{m}(N_{1z} + N_{2z} - R_z - F_{1z} - F_{2z} - G_k) \frac{t^2}{2} + L_1 t + L_2, \tag{13}$$

де  $C_1, C_2, L_1, L_2$  – довільні сталі.

Для знаходження довільних сталих необхідно задати початкові та граничні умови: при  $t_0 = 0$ :  $x = x_0$ ,  $z = -h$ ,  $\dot{x} = 0$ ,  $\dot{z} = 0$ ,

$$\begin{aligned}
 N_{1x} &= N_{G1x} + N_{I1x}, & N_{2x} &= N_{G2x} + N_{I2x}, \\
 F_{1x} &= F_{G1x} + F_{I1x}, & F_{2x} &= F_{G2x} + F_{I2x}, \\
 N_{1z} &= N_{G1z} + N_{I1z}, & N_{2z} &= N_{G2z} + N_{I2z}, \\
 F_{1z} &= F_{G1z} + F_{I1z}, & F_{2z} &= F_{G2z} + F_{I2z}.
 \end{aligned}$$

Отже, система диференціальних рівнянь (3) після підстановки всіх знайдених величин набуває такого вигляду:

$$\left. \begin{aligned}
 m\ddot{x} &= N_{1x} + N_{2x} - R_x + F_{1x} + F_{2x} - Q, \\
 m\ddot{z} &= N_{1z} + N_{2z} - R_z - F_{1z} - F_{2z} - G_k.
 \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

Очевидно, що процес вилучення коренеплоду з ґрунту буде можливий за такої умови:

$$N_{1z} + N_{2z} - F_{1z} - F_{2z} - G_k > R_z, \tag{10}$$

або, враховуючи отримані вище значення:

$$\text{при } t = t_1: \quad x = x_1, \quad z = 0, \quad \dot{x}_1 = V_1,$$

де  $t_0$  – момент початку вилучення коренеплоду;  $t_1$  – кінцевий момент процесу вилучення коренеплоду;  $x_0$  – відстань вертикальної осі коренеплоду від початку координат в момент часу  $t_0$ ;  $x_1$  – відстань вертикальної осі коренеплоду від початку координат в кінцевий момент вилучення  $t_1$ ;  $h$  – глибина знаходження коренеплоду в ґрунті;  $V_1$  – швидкість коренеплоду в кінцевий момент вилучення.

Враховуючи початкові умови, отримуємо значення довільних сталих:

$$C_1 = 0, \quad L_1 = 0, \quad C_2 = x_0, \quad L_2 = -h. \tag{14}$$

Після підстановки (14) в (12) і в (13) отримуємо:

$$\dot{x} = \frac{1}{m}(N_{1x} + N_{2x} - R_x + F_{1x} + F_{2x} - Q)t, \tag{15}$$

$$\dot{z} = \frac{1}{m}(N_{1z} + N_{2z} - R_z - F_{1z} - F_{2z} - G_k)t, \tag{16}$$

$$x = \frac{1}{m}(N_{1x} + N_{2x} - R_x + F_{1x} + F_{2x} - Q) \frac{t^2}{2} + x_0, \tag{17}$$



$$z = \frac{1}{m} (N_{1z} + N_{2z} - R_z - F_{1z} - F_{2z} - G_k) \frac{t^2}{2} - h. \quad (18)$$

Підставимо у вирази (15)–(18) отримані вище значення для сил (4)–(5). Виконавши необхідні перетворення, матимемо:

$$\dot{x} = \frac{1}{m} \left\{ \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} \left[ \frac{G}{\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma} + \frac{2ab\gamma_{\text{од.}} V^2 \sin \delta \sin \gamma}{g(\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma)} \right] + \frac{Gf_1(\cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \cos \delta)}{\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma} + \frac{2f_1ab\gamma_{\text{од.}} V^2 \sin \delta \sin \gamma (\cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \cos \delta)}{g(\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma)} - 2abk_{y\text{од.}} - R_x \right\} t, \quad (19)$$

$$\dot{z} = \frac{1}{m} \left\{ \frac{\operatorname{tg} \beta}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} \left[ \frac{G}{\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma} + \frac{2ab\gamma_{\text{од.}} V^2 \sin \delta \sin \gamma}{g(\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma)} \right] - \frac{Gf_1 \sin \delta \sin \gamma}{\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma} - \frac{2f_1ab\gamma_{\text{од.}} V^2 \sin^2 \delta \sin^2 \gamma}{g(\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma)} - G_k - R_z \right\} t, \quad (20)$$

$$x = \frac{1}{m} \left\{ \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} \left[ \frac{G}{\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma} + \frac{2ab\gamma_{\text{од.}} V^2 \sin \delta \sin \gamma}{g(\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma)} \right] + \frac{Gf_1(\cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \cos \delta)}{\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma} + \frac{2f_1ab\gamma_{\text{од.}} V^2 \sin \delta \sin \gamma (\cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \cos \delta)}{g(\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma)} - 2abk_{y\text{од.}} - R_x \right\} \frac{t^2}{2} + x_0, \quad (21)$$

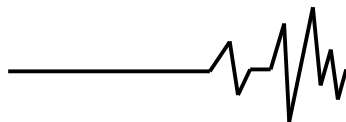
$$z = \frac{1}{m} \left\{ \frac{\operatorname{tg} \beta}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} \left[ \frac{G}{\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma} + \frac{2ab\gamma_{\text{од.}} V^2 \sin \delta \sin \gamma}{g(\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma)} \right] - \frac{Gf_1 \sin \delta \sin \gamma}{\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma} - \frac{2f_1ab\gamma_{\text{од.}} V^2 \sin^2 \delta \sin^2 \gamma}{g(\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma)} - G_k - R_z \right\} \frac{t^2}{2} - h, \quad (22)$$

З рівняння (18) можна визначити час  $t_1$  вилучення коренеплоду з ґрунту. Він буде дорівнювати:

$$t_1 = \sqrt{\frac{2mh}{N_{1z} + N_{2z} - F_{1z} - F_{2z} - R_z - G_k}}. \quad (23)$$

Підставимо у вираз (23) отримані вище значення сил, що до нього входять. Після ряду перетворень отримуємо таке значення часу  $t_1$ :

$$t_1 = \sqrt{\frac{2mgh(\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma) \sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}}{(Gg + 2ab\gamma_{\text{од.}} V^2 \sin \delta \sin \gamma)(\operatorname{tg} \beta - \sin \gamma \sin \delta f_1 \times \frac{1}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}}) - (R_z + G_k)q(\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma) \times \frac{1}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}}}}. \quad (24)$$



Оскільки  $t_1$  є час вилучення коренеплоду з ґрунту лемішним копачем, то вираз (24) можна використати для визначення продуктивності агрегату для викопування коренеплодів.

У випадку, коли умова (11) не виконується, тобто має місце протилежна нерівність, коренеплід залишається зв'язаним з ґрунтом, і його руху вздовж осі  $Oz$  не відбувається. Проте під дією сил, що входять у перше рівняння системи (9), а саме сили:

$$P_x = N_{1x} + N_{2x} + F_{1x} + F_{2x} - Q, \quad (25)$$

яка долає силу опору  $R_x$ , що зв'язує коренеплід з ґрунтом, відбувається згинання коренеплоду як консольної балки, оскільки верхня частина коренеплоду буде зміщуватись у бік дії сили  $P_x$  на деяку критичну величину, після чого може наступити зламування коренеплоду.

Отже існує деяка допустима сила  $[P_x]$ , при якій не відбувається пошкодження (зламування) коренеплодів. Підставимо в (25) замість сили  $P_x$  допустиме її значення  $[P_x]$ :

$$[P_x] = N_{1x} + N_{2x} + F_{1x} + F_{2x} - Q, \quad (26)$$

або, враховуючи вже визначені значення сил, що входять у праву частину цього виразу отримаємо:

$$[P_x] = N_{G1x} + N_{G2x} + N_{I1x} + N_{I2x} + F_{G1x} + F_{G2x} + F_{I1x} + F_{I2x} - Q. \quad (27)$$

Отже, враховуючи симетричне розташування клинів, матимемо:

$$[P_x] = 2N_{G1x} + 2N_{I1x} + 2F_{G1x} + 2F_{I1x} - Q, \quad (28)$$

Перепишемо вираз (28) таким чином:

$$2N_{I1x} + 2F_{I1x} = [P_x] - 2N_{G1x} - 2F_{G1x} - Q. \quad (29)$$

Замінімо сили, що входять у вираз (29), їх значеннями. Матимемо:

$$\begin{aligned} & \frac{2ab\gamma_{об.}}{g} \cdot \frac{V^2 \sin \delta \sin \gamma \operatorname{tg} \gamma}{(\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma) \sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} + 2f_1 \frac{ab\gamma_{об.} V^2 \sin \delta \sin \gamma (\cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \cos \delta)}{g (\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma)} = \\ & = [P_x] - \frac{G \operatorname{tg} \gamma}{(\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma) \sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} - \frac{f_1 G (\cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \cos \delta)}{(\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma)} + 2ab k_{y\delta}. \end{aligned} \quad (30)$$

З виразу (30) визначаємо швидкість  $V$  поступального руху лемішного копача, при якій не будуть пошкоджуватись (обламуватись) коренеплоди. Вона буде дорівнювати:

$$\begin{aligned} V = & \sqrt{\frac{g([P_x] + 2abk_{y\delta}) (\cos \delta - f \sin \delta \sin \gamma) \sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta} -}{2ab\gamma_{об.} \sin \delta \sin \gamma \left[ \operatorname{tg} \gamma + f_1 (\cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \cos \delta) \times \right.}} \\ & \left. - \frac{gG \operatorname{tg} \gamma - f_1 gG (\cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \cos \delta) \sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}}{\times \sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} \right]} \end{aligned} \quad (31)$$

Таким чином, остаточно знайдені кінематичні параметри вилучення коренеплодів з ґрунту лемішним копачем, які виражені через його геометричні параметри і враховують умови якісного виконання даного технологічного процесу.

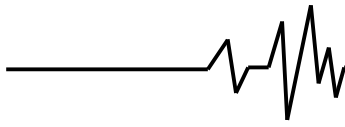
Для практичного використання виразу (31) необхідно визначити зв'язок між двогранним кутом  $\delta$  і кутами  $\beta$  та  $\gamma$ , які фактично визначають усі кутові параметри

клинів, оскільки третій кут  $\alpha$  можна визначити через кути  $\beta$  і  $\gamma$ . Як бачимо з рис. 1:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{c_1}{a_1}, \quad (32)$$

звідки отримуємо:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \beta}. \quad (33)$$



Таким чином, кут  $\delta$  повинен бути визначений через кути  $\beta$  і  $\gamma$ . З рис. 1 можна отримати такі співвідношення:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{O_1 B_1}{O_1 M_1}, \quad (34)$$

та  $O_1 M_1 = O_1 A_1 \sin \gamma$ . (35)

Враховуючи, що  $O_1 B_1 = c_1$  і

$O_1 A_1 = a_1$ , будемо мати:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{c_1}{a_1 \sin \gamma}. \quad (36)$$

Остаточно отримуємо:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\cos \gamma \operatorname{tg} \beta}, \quad (37)$$

або  $\operatorname{tg} \delta = \frac{\cos \beta}{\sin \beta \cos \gamma}$ , (38)

звідки остаточно отримуємо значення кута  $\delta$ :

$$\delta = \operatorname{arctg} \frac{\cos \beta}{\sin \beta \cos \gamma}. \quad (38)$$

Таким чином, змінюючи геометричні параметри клинів лемішного копача, а саме кути  $\beta$  і  $\gamma$ , на підставі отриманих вище аналітичних залежностей, можна знаходити необхідні кінематичні параметри лемішного викопуючого робочого органу з умовою не пошкодження коренеплодів. Так, використовуючи вираз (31), можна знайти залежність допустимої швидкості  $V$  поступального руху копача від зміни його кутів  $\beta$  і  $\gamma$  при незмінних усіх інших заданих його конструкційних параметрах, що входять в вираз (31).

Згідно складеної програми для ПЕОМ виконані розрахунки допустимої швидкості  $V$  руху лемішного копача за умови не пошкодження коренеплодів цукрових буряків, при різних значеннях кутів  $\gamma$  та декількох фіксованих значеннях кутів  $\beta$ . Вихідні дані для розрахунків наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри для розрахунків лемішного викопуючого робочого органу

Параметр	$a$	$[P_x]$	$\gamma_{об.}$	$f$	$f_1$	$g$
Значення	0,12 м	200 Н	11000 Н/м <sup>3</sup>	0,60	0,50	9,81 м/с <sup>2</sup>

При цьому деякі конструкційні параметри лемішного копача та технологічного процесу, який він виконує, зв'язані між собою такими залежностями:

ширина деформованого пласта ґрунту:

$$b = a \operatorname{tg} \beta = 0,12 \operatorname{tg} \beta, \quad (39)$$

вага пласта ґрунту:

$$G = \gamma_{об.} a^2 (2a \operatorname{tg} \beta + 0,05) \frac{\operatorname{tg} \beta}{\sin \gamma}. \quad (40)$$

За результатами чисельного розрахунку побудовані графіки зміни швидкості  $V$  поступального руху лемішного копача в залежності від різних значень кута  $\gamma$  (рис. 2).

Як видно з представлених графіків, залежності вказаних параметрів мають характер, близький до лінійного. При цьому, при збільшенні кута атаки  $\gamma$  лемішного копача

значення поступальної швидкості  $V$  його руху, що забезпечує вилучення коренеплодів з ґрунту без їх пошкодження, знижується. Стосовно впливу кута розвалу  $\beta$  лемішного копача на поступальну швидкість  $V$  його руху, то, як видно з графіків, використання більших

значень таких кутів забезпечує і більш високий рівень поступальної швидкості руху. Якщо врахувати, що статистичне значення кута  $\gamma_k$  конуса коренеплоду цукрового буряка складає 20...28°, то використання кута  $\beta$  розвалу лемішного копача близького до 30° також забезпечує більш високий рівень поступальної швидкості руху.

Отримані результати розрахунків показують таким чином, що найбільш раціональними значеннями кутів  $\gamma$  і  $\beta$ , при яких забезпечується висока швидкість  $V$  поступального руху лемішного копача і вилучення коренеплодів цукрових буряків з ґрунту без їх пошкодження, слід вважати  $\gamma = 13...16^\circ$ ,  $\beta = 20...30^\circ$ .

Таким чином, результати чисельних розрахунків на ПЕОМ отриманих аналітичних залежностей підтверджують їх правильність і дають підґрунтя для практичного використання при проектуванні та розрахунках нових, більш вдосконалених викопуючих робочих органів бурякозбиральних машин [7-9].

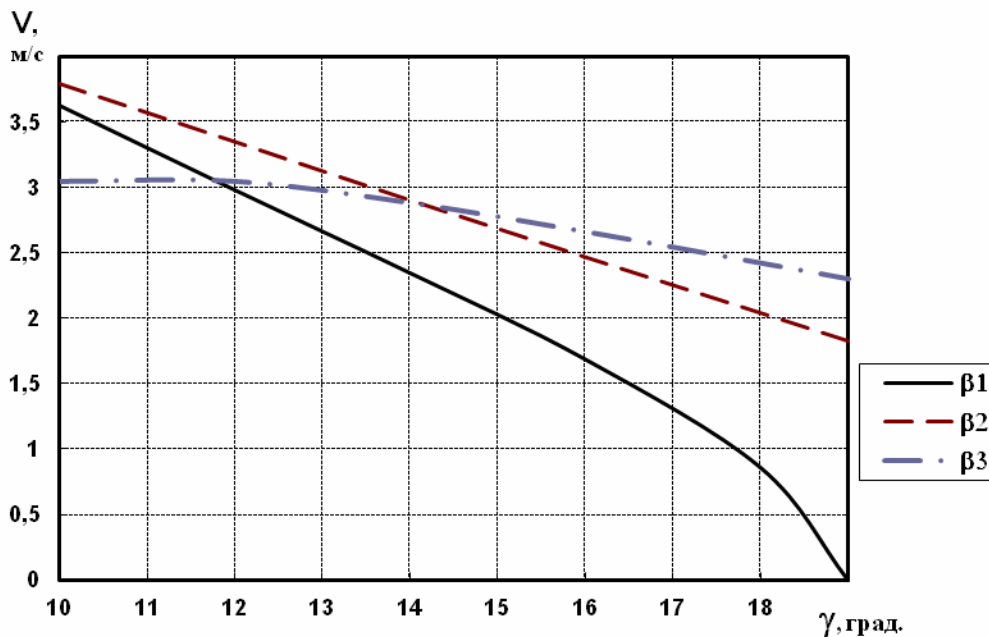
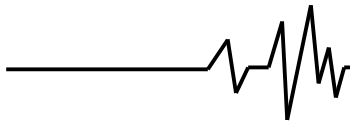


Рис. 2. Залежність допустимої швидкості поступального руху  $V$  лемішного викопуючого органу від кута  $\gamma$ :  $\beta_1 = 15^\circ$ ,  $\beta_2 = 20^\circ$ ,  $\beta_3 = 30^\circ$

#### Висновки

1. Отримано систему диференціальних рівнянь руху коренеплоду при безпосередньому вилученні з ґрунту звичайним лемішним копачем, розв'язок якої дав можливість визначити закон руху коренеплоду по робочих поверхнях викопуючих лемешів до повного його вилучення, а також час вилучення коренеплоду з ґрунту.

2. Визначено умови незламування хвостової частини коренеплодів при викопуванні звичайним лемішним копачем за допустимою на зламування боковою силою, з яких визначено допустиму швидкість поступального руху копача, що забезпечує незламування коренеплодів.

3. Отримано залежності допустимої швидкості поступального руху копача, що забезпечує вилучення коренеплодів без їх обламування, від кутових параметрів викопуючого робочого органу. Розрахунки показують, що найбільш раціональними значеннями кутів  $\gamma$  і  $\beta$ , при яких забезпечується висока швидкість поступального руху лемішного копача і вилучення коренеплодів цукрового буряку з ґрунту без обламування, слід вважати  $\gamma = 13 \dots 16^\circ$ ,  $\beta = 20 \dots 30^\circ$ .

#### Література

1. Булгаков В.М. Бурякозбиральні машини / – К.: Аграрна наука, 2010. – 352 с.  
2. Василенко П.М. и др. Вибрационный способ уборки корнеплодов // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства, 1970, №2. – С. 9 – 13.

3. Булгаков В.М., Головач І.В. Уточнена теорія викопуючого робочого органу лемішного типу // Вісник аграрної науки Причорномор'я. Спеціальний випуск 4(18). Том I. – Миколаїв: МДАУ, 2002. – С. 37 – 63.

4. Булгаков В.М., Головач І.В., Войтюк Д.Г. Математичне моделювання поздовжніх коливань коренеплоду при вібраційному вилученні з ґрунту. – Вібрації в техніці та технологіях, 2003, № 1(27). – С. 11 – 14.

5. Свеклоуборочные машины (конструирование и расчет) / Л.В. Погорелый, Н.В. Татьяна, В.В. Брей и др.; Под общ. ред. Л.В. Погорелого. – К.: Техніка, 1983. – 168 с.

6. Булгаков В.М., Головач І.В. Теорія вібраційного викопування коренеплодів. – Збірник наукових праць Національного аграрного університету "Механізація сільськогосподарського виробництва", 2003. Том XIV. – С. 34-86.

7. Віброкопач для коренеплодів. Патент України № 9709, опубл. в бюл. № 3, 1996 // Булгаков В.М., Зиков П.Ю., Войтюк Д.Г., Цурпал І.А., Фінько С.В., Савченко А.М.

8. Віброкопач для коренеплодів. Патент України № 10723, опубл. в бюл. № 4, 1996 // Булгаков В.М., Зиков П.Ю., Войтюк Д.Г., Цурпал І.А., Фінько С.В., Савченко А.М.

9. Віброкопач для коренеплодів. Патент України № 10724, опубл. в бюл. № 4, 1996 // Булгаков В.М., Зиков П.Ю., Войтюк Д.Г., Цурпал І.А., Фінько С.В., Савченко А.М.