

УДК 631.356.2

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВІБРАЦІЙНОГО ВИКОПУВАННЯ КОРЕНЕПЛОДУ ЦУКРОВОГО БУРЯКУ

І.В. Головач, докт. техн. наук, **М.Г. Березовий**, канд. техн. наук,
О.М. Черниш, канд. техн. наук
НУБіП України

Побудована нова математична модель, що описує процес вібраційного викопування коренеплоду цукрового буряку, яке здійснюється під дією вертикальної збурюючої сили та тягового зусилля, що надаються йому від вібраційного викопуючого робочого органу. Отримані системи диференціальних рівнянь, розв'язування яких дало можливість знайти закон руху коренеплоду в процесі його безпосереднього вібраційного вилучення.

Ключові слова: коренеплід, викопуючий робочий орган, вібраційний процес, математична модель, збурююча сила, диференціальні рівняння.

Проблема. Вібраційне викопування коренеплодів цукрового буряку з ґрунту має ряд суттєвих переваг у порівнянні з іншими способами. Воно характеризується меншим пошкодженням коренеплодів, зниженням втрат врожаю при збиранні, більш інтенсивним очищенням коренеплодів від налиплого ґрунту, меншим захаращенням робочого русла копача ґрунтом та залишками бур'янів. Тому саме цей технологічний процес потребує докладного аналітичного дослідження та подальшої розробки і широкого впровадження вдосконалених вібраційних викопуючих органів. Теоретичні дослідження технологічного процесу вібраційного викопування коренеплодів цукрового буряку з ґрунту дають можливість науково обґрунтувати конструктивні і кінематичні параметри вібраційних викопуючих робочих органів. Такі дослідження необхідні, у першу чергу, для теоретичного аналізу роботи вібраційних викопуючих органів у несприятливих умовах, на важких і твердих ґрунтах, де надійність роботи бурякозбиральних машин суттєво знижується. В свою чергу, глибокий теоретичний аналіз будь-якого технологічного процесу можливий лише за наявності адекватних математичних моделей, що описують даний процес.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ґрунтовні теоретичні і експериментальні дослідження вібраційного викопування корене-

© І.В. Головач, М.Г. Березовий, О.М. Черниш.

Механізація та електрифікація сільського господарства. Вип. 96. 2012.

плодів цукрових буряків були достатньо широко висвітлені у працях [1 – 6].

Так, у праці [6] процес вилучення коренеплоду з ґрунту розглядається у найбільш загальному вигляді – при несиметричному захваті коренеплоду вібраційним викопуючим робочим органом. Даний процес описується за допомогою кінематичних і динамічних рівнянь Ейлера. Отримана у праці [6] система диференціальних рівнянь описує просторовий коливальний процес закріпленого у ґрунті коренеплоду, як у пружному середовищі, з однією точкою закріплення. У даній роботі процес вібраційного вилучення коренеплоду з ґрунту розглядається при симетричному захваті коренеплоду обома лемешами вібраційного викопуючого органу.

Саме при такому захваті коренеплоду викопуючими лемешами і можливий процес подальшого повного вилучення коренеплоду з ґрунту. Тому дослідимо процес безпосереднього вилучення коренеплоду з ґрунту при симетричному захваті його вібраційним викопуючим робочим органом.

Мета дослідження. Побудувати математичну модель безпосереднього вилучення коренеплоду цукрового буряку з ґрунту, яке здійснюється під дією вертикальної збуруючої сили, що надається коренеплоду від вібраційного викопуючого робочого органу, та тягового зусилля внаслідок поступального руху копача.

Результати дослідження. Зробимо спочатку необхідну формалізацію технологічного процесу, який буде розглядатись. Незважаючи на те, що процес вилучення з ґрунту коренеплоду цукрового буряку відбудеться за дуже короткий проміжок часу (оскільки поступальна швидкість коренезбиральних машин може досягати 2 м/с) весь технологічний процес можна умовно поділити на окремі взаємопов'язані, послідовні операції. Оскільки, як зазначалось вище, вилучення можливе лише при симетричному захваті коренеплоду робочим органом, то одночасно з поступальними коливаннями коренеплоду відбуваються кутові коливання коренеплоду навколо умовної точки закріплення на деякий кут.

На першому етапі вилучення, а особливо при перших коливаннях, відновлююча сила при кутових коливаннях, а отже, і її момент відносно умовної точки закріплення, будуть максимальними. Тому кут нахилу коренеплоду буде досить незначний і можливе повне (або часткове) відновлення його вертикального положення внаслідок поступального руху копача. Проте, завдяки дії поступальних коливань коренеплоду

разом з оточуючим його ґрунтом, ущільненість зазначеного ґрунту буде зменшуватись, а тому відновлююча сила при кутових коливаннях також буде зменшуватись. Отже, з кожним наступним коливанням кут нахилу коренеплоду буде збільшуватись, а відновлення попереднього положення – зменшуватись. Коренеплід буде розхитуватись навколо умовної точки закріплення з поступовим збільшенням кута нахилу коренеплоду уперед по ходу копача. Це буде призводити до розриву зв'язків коренеплоду з ґрунтом у напрямку руху копача, починаючи з верхньої частини конічної поверхні знаходження коренеплоду у нерозпушеному ґрунті, поступово наближаючись до умовної точки його закріплення. Отже, з вищенаведеного випливає, що руйнування зв'язків коренеплоду з ґрунтом одночасно відбувається у двох напрямках – вздовж поступального руху копача і у напрямку перпендикулярно до вказаного (по глибині розташування коренеплоду у ґрунті). При цьому сили зв'язку коренеплоду з ґрунтом і сили пружності ґрунту будуть поступово зменшуватись до такої мінімальної величини, коли коливальні процеси перейдуть у процеси неперервного переміщення коренеплоду вгору і уперед – вздовж поступального руху копача, а також неперервного повороту коренеплоду навколо його центра мас на деякий кут до повного вилучення коренеплоду з ґрунту. Сили ж пружності ґрунту просто перейдуть у сили опору розпушеного ґрунту при русі коренеплоду у робочому руслі копача. Після цього настає етап безпосереднього вилучення коренеплоду цукрового буряку з ґрунту.

Для побудови математичної моделі насамперед складемо еквівалентну схему взаємодії коренеплоду з робочими поверхнями вібраційного викопуючого робочого органу при його безпосередньому вилученні (рис.). Для чого представимо вібраційний викопуючий робочий орган у вигляді двох спарених викопуючих поверхонь (клинів) $A_1B_1C_1$ і $A_2B_2C_2$, кожний з яких у просторі має нахил під кутами α , β , γ і які встановлено таким чином один до одного, що утворюється робоче русло, задня частина якого звужується. Вказані клини здійснюють коливальні рухи в повздовжньо-вертикальній площині (механізм приводу лемешів у коливальний рух не показано), з відповідними амплітудою і частотою. Напрямок поступального руху вібраційного викопуючого робочого органу показано стрілкою. Проекції точок B_1 і B_2 на вісь O_1y_1 позначені точками D_1 і D_2 відповідно.

Вважаємо, що з поверхнями клинів $A_1B_1C_1$ і $A_2B_2C_2$ у відповідних точках взаємодіє коренеплід, який апроксимується тілом конусоподібної форми, причому захват коренеплоду робочим органом відбувається

ся симетрично з обох його боків.

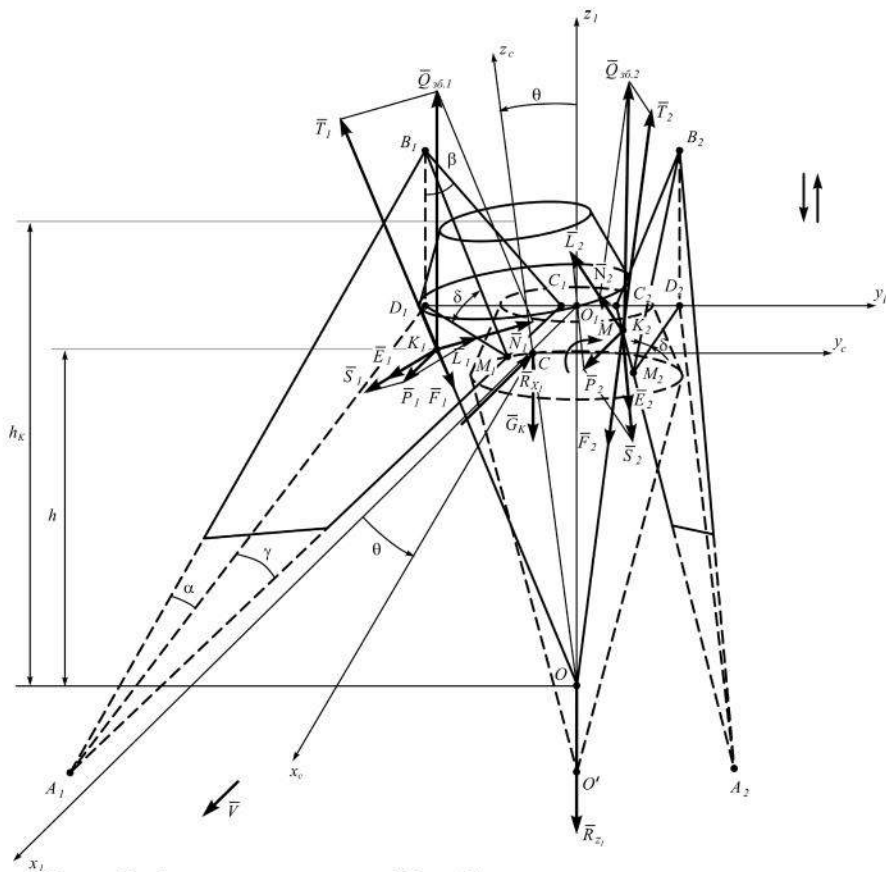


Рис. Еквівалентна схема вібраційного викопування коренеплоду цукрового буряку

Припускаємо далі, що робоча поверхня клина $A_1B_1C_1$ здійснює безпосередній контакт з коренеплодом у точці K_1 , а поверхня $A_2B_2C_2$ – у точці K_2 . Прямі, проведені через точки контакту коренеплоду K_1 і K_2 і точки B_1 і B_2 , утворюють на перетині зі сторонами клинів A_1C_1 і A_2C_2 відповідні точки M_1 і M_2 . Таким чином, δ – це двограний кут ($\angle B_1M_1D_1$) між нижньою основою $A_1D_1C_1$ та робочою поверхнею клина $A_1B_1C_1$ або відповідно двограний кут ($\angle B_2M_2D_2$) між нижньою основою $A_2D_2C_2$ та робочою поверхнею клина $A_2B_2C_2$.

Покажемо сили, які виникають внаслідок взаємодії коренеплоду з вібраційним робочим органом.

Нехай від вібраційного викопуючого робочого органу діє вертикальна збуруюча сила $\bar{Q}_{зб.}$, яка змінюється за гармонійним законом такого вигляду:

$$\bar{Q}_{зб.} = H \sin \omega t, \quad (1)$$

де H – амплітуда збуруючої сили; ω – частота збуруючої сили.

Дана сила відіграє основну роль у процесі розпушування ґрунту в зоні робочого русла копача та вилучення коренеплоду. Зазначена збуруюча сила $\bar{Q}_{зб.}$ прикладається до коренеплоду з двох його боків, а тому на схемі вона представлена двома складовими $\bar{Q}_{зб.1}$ та $\bar{Q}_{зб.2}$. Ці сили прикладені відповідно у точках K_1 і K_2 на відстані h від умовної точки закріплення O і саме вони викликають коливання коренеплоду в повздовжньо-вертикальній площині, які руйнують зв'язки коренеплоду з ґрунтом і створюють для останнього умови вилучення з ґрунту.

Оскільки захват коренеплоду симетричний, то очевидно, що буде мати місце наступне співвідношення:

$$\bar{Q}_{зб.1} = \bar{Q}_{зб.2} = \frac{1}{2} H \sin \omega t. \quad (2)$$

Розкладемо дані сили на нормальні \bar{N}_1 і \bar{N}_2 і дотичні складові \bar{T}_1 і \bar{T}_2 , як це показано на рис. Оскільки вібраційний копач рухається поступально у напрямку осі O_1x_1 відносно коренеплоду, який закріплений у ґрунті, то в момент захвату коренеплоду робочим органом у напрямку осі O_1x_1 діють також рушійні сили \bar{P}_1 і \bar{P}_2 . Розкладемо сили \bar{P}_1 і \bar{P}_2 на дві складові: нормальні \bar{L}_1 і \bar{L}_2 і дотичні \bar{S}_1 і \bar{S}_2 до поверхонь $A_1B_1C_1$ і $A_2B_2C_2$.

Крім того, у точках контакту K_1 і K_2 діють сили тертя \bar{F}_{K1} і \bar{F}_{K2} відповідно, які протидіють проковзуванню коренеплоду по робочій поверхні клинів $A_1B_1C_1$ і $A_2B_2C_2$ під час його захвату вібраційним робочим органом. Вектори цих сил напрямлені протилежно вектору відносної швидкості проковзування коренеплоду по поверхні клинів.

Проковзування коренеплоду по поверхні клинів може відбуватися у напрямку дії сил \bar{T}_1 , \bar{T}_2 (паралельно лініям B_1M_1 та B_2M_2) та у напрямку, протилежному дії сил \bar{S}_1 , \bar{S}_2 , за рахунок сил опору ґрунту.

Тому, вектор відносної швидкості проковзування коренеплоду по поверхні клинів можна розкласти на складові у зазначених вище напрямках. Отже, силу тертя \bar{F}_{K1} також можна розкласти на дві складові: \bar{F}_1 – у напрямку, протилежному вектору \bar{T}_1 , та \bar{E}_1 – у напрямку вектора

\bar{S}_1 .

Аналогічно, силу тертя $\bar{F}_{\kappa 2}$ також можна розкласти на дві складові: \bar{F}_2 – у напрямку, протилежному вектору \bar{T}_2 , та \bar{E}_2 – у напрямку вектора \bar{S}_2 .

Очевидно, що $F_1 = F_2$, $E_1 = E_2$.

У центрі ваги коренеплоду (точка C) діє сила ваги коренеплоду \bar{G}_k . Сили опору розпушеного ґрунту при русі коренеплоду у робочому руслі копача у напрямку осей O_1x_1 та O_1z_1 позначені через \bar{R}_{x1} та \bar{R}_{z1} відповідно.

При безпосередньому вилученні коренеплоду з ґрунту буде здійснюватись поворот коренеплоду навколо його центра мас C під дією пари сил опору розпушеного ґрунту. Позначимо момент цієї пари сил через M .

Сили опору розпушеного ґрунту \bar{R}_{x1} , R_{z1} при безпосередньому вилученні коренеплоду та момент пари M вважаємо постійними величинами.

Складемо спочатку диференціальні рівняння руху центра мас коренеплоду (точка C), тобто поступального руху коренеплоду вздовж осей O_1x_1 і O_1z_1 . Враховуючи вищеприведену схему сил, диференціальне рівняння руху центра мас коренеплоду у векторній формі при його безпосередньому вилученні буде мати наступний вигляд:

$$m_k \bar{a} = \bar{N}_1 + \bar{N}_2 + \bar{L}_1 + \bar{L}_2 + \bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \bar{E}_1 + \bar{E}_2 + \bar{G}_k + \bar{R}_{z1} + \bar{R}_{x1}. \quad (3)$$

Оскільки процес вилучення, як було зазначено вище, відбувається при симетричному захваті коренеплоду робочим органом, то рух коренеплоду вздовж робочого русла копача відбувається фактично у повздовжньо-вертикальній площині (площині $x_1O_1z_1$), а тому векторне рівняння (3) зводиться до системи двох рівнянь у проєкціях на осі Ox_1 і Oz_1 .

Після визначення значень усіх сил, що входять у векторне рівняння (3), та їх проєкцій на осі Ox_1 і Oz_1 отримаємо дві системи рівнянь.

При цьому система диференціальних рівнянь (4) описує процес безпосередньо вібраційного вилучення коренеплоду цукрового буряку з ґрунту (тобто відрізок, на якому на коренеплід діє періодична збуруюча сила), а система диференціальних рівнянь (5) описує процес вилучення коренеплоду з ґрунту, коли на нього не діє збуруюча сила. Тобто один і той же вібраційний викопуючий робочий орган у різні проміжки часу може здійснювати процес викопування коренеплоду як

звичайний лемішний копач.

$$\left. \begin{aligned}
 \ddot{x}_1 &= \frac{1}{m_k} \left[\frac{\cos \delta \operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} + f \cos^2 \delta \sin \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \sin \gamma + \right. \\
 &+ \left. f \cos \delta \cos \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \cos \gamma \right] H \sin \omega t + \frac{2}{m_k} \times \\
 &\times \left[\frac{\sin \gamma \operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} + f \sin^2 \gamma \sin \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \cos \delta + \right. \\
 &+ \left. f \sin \gamma \cos \gamma \cos \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \right] P_1 - \frac{R_{x1}}{m_k}, \\
 \ddot{z}_1 &= \frac{1}{m_k} \left[\frac{\cos \delta \operatorname{tg} \beta}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} - f \cos \delta \sin \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \sin \delta \right] H \sin \omega t + \\
 &+ \frac{2}{m_k} \left[\frac{\sin \gamma \operatorname{tg} \beta}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} - f \sin \gamma \sin \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \sin \delta \right] P_1 - \frac{R_{z1}}{m_k} - g, \\
 \omega t &\in [2k\pi, 2(k+1)\pi], \quad k = 0, 1, 2, \dots
 \end{aligned} \right\} (4)$$

i

$$\left. \begin{aligned}
 m_k \ddot{x}_1 &= \frac{2P_1 \sin \gamma \operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} + 2f P_1 \sin^3 \gamma \cos \delta + f P_1 \sin 2\gamma \cos \gamma - R_{x1}, \\
 m_k \ddot{z}_1 &= \frac{2P_1 \sin \gamma \operatorname{tg} \beta}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} - 2f P_1 \sin^2 \gamma \sin \delta - G_k - R_{z1}, \\
 \omega t &\in [(2k-1)\pi, 2k\pi], \quad k = 1, 2, \dots
 \end{aligned} \right\} (5)$$

Розв'яжемо отримані системи диференціальних рівнянь.

Для даних систем диференціальних рівнянь (4), (5) початкові умови будуть мати такий вигляд. При $t = 0$:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= 0, & \dot{z}_1 &= 0, \\
 x_1 &= x_{10}, & z_1 &= -\frac{1}{3} h_k.
 \end{aligned} \quad (6)$$

Система диференціальних рівнянь (4) є системою лінійних диференціальних рівнянь другого порядку. Як відомо, вона розв'язується в квадратурах. Для спрощення запису введемо наступні позначення:

$$\frac{1}{m_k} \left[\frac{\cos \delta \operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} + f \cos^2 \delta \sin \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \sin \gamma + \right. \\ \left. + f \cos \delta \cos \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \cos \gamma \right] = \varphi_1, \quad (7)$$

$$\frac{2}{m_k} \left[\frac{\sin \gamma \operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} + f \sin^2 \gamma \sin \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \cos \delta + \right. \\ \left. + f \sin \gamma \cos \gamma \cos \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \right] = \psi_1, \quad (8)$$

$$\frac{1}{m_k} \left[\frac{\cos \delta \operatorname{tg} \beta}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} - f \cos \delta \sin \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \sin \delta \right] = \varphi_2, \quad (9)$$

$$\frac{2}{m_k} \left[\frac{\sin \gamma \operatorname{tg} \beta}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} - f \sin \gamma \sin \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \sin \delta \right] = \psi_2. \quad (10)$$

Враховуючи вирази (7) – (10), система диференціальних рівнянь (4) набуде наступного вигляду:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_1 &= \varphi_1 H \sin \omega t + \psi_1 P_1 - \frac{R_{x1}}{m_k}, \\ \ddot{z}_1 &= \varphi_2 H \sin \omega t + \psi_2 P_1 - \frac{R_{z1}}{m_k} - g. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Проінтегруємо систему диференціальних рівнянь (11). Після двократного інтегрування і знаходження довільних сталих отримуємо наступні розв'язки системи диференціальних рівнянь (4):

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{\varphi_1 H}{\omega} \cos \omega t + \psi_1 P_1 t - \frac{R_{x1} t}{m_k} + \frac{\varphi_1 H}{\omega}, \\ \dot{z}_1 &= -\frac{\varphi_2 H}{\omega} \cos \omega t + \psi_2 P_1 t - \frac{R_{z1} t}{m_k} - g t + \frac{\varphi_2 H}{\omega}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= -\frac{\varphi_1 H}{\omega^2} \sin \omega t + \frac{\psi_1 P_1 t^2}{2} - \frac{R_{x1} t^2}{2m_k} + \frac{\varphi_1 H t}{\omega} + x_{10}, \\ z_1 &= -\frac{\varphi_2 H}{\omega^2} \sin \omega t + \frac{\psi_2 P_1 t^2}{2} - \frac{R_{z1} t^2}{2m_k} - \frac{g t^2}{2} + \frac{\varphi_2 H t}{\omega} - \frac{1}{3} h_k. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Системи рівнянь (12) і (13) відповідно описують закони зміни швидкості і переміщення центра мас коренеплоду у процесі його безпосереднього вилучення з ґрунту. З другого рівняння системи (13) можна визначити час t безпосереднього вилучення коренеплоду з ґрунту. Для цього необхідно у ліву частину зазначеного рівняння підставити значення $z_1 = 0$ і розв'язати отримане рівняння відносно t . Оскільки рівняння є трансцендентним, то отримати аналітичний вираз для визначення t неможливо, проте його можна розв'язати на ПЕОМ за допомогою відомих чисельних методів. Обчислене значення t_1 можна застосувати для визначення продуктивності агрегату для викопування коренеплодів, вібраційними викопуючими робочими органами.

Розв'яжемо далі систему диференціальних рівнянь (5). Для спрощення запису даної системи також введемо наступні позначення:

$$\frac{1}{m_k} \left(\frac{2 \sin \gamma t g \gamma}{\sqrt{t g^2 \gamma + 1 + t g^2 \beta}} + 2 f \sin^3 \gamma \cos \delta + f \sin 2 \gamma \cos \gamma \right) = \psi'_1, \quad (14)$$

$$\frac{1}{m_k} \left(\frac{2 \sin \gamma t g \beta}{\sqrt{t g^2 \gamma + 1 + t g^2 \beta}} - 2 f \sin^2 \gamma \sin \delta \right) = \psi'_2. \quad (15)$$

З урахуванням виразів (14), (15) система диференціальних рівнянь (5) буде:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_1 &= \psi'_1 P_1 - \frac{R_{x1}}{m_k}, \\ \ddot{z}_1 &= \psi'_2 P_1 - \frac{G_k}{m_k} - \frac{R_{z1}}{m_k}, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$\omega t \in [(2k-1)\pi, 2k\pi], \quad k = 1, 2, \dots$$

Після двократного інтегрування системи рівнянь (16) і знаходження довільних сталих отримаємо розв'язки системи диференціальних рівнянь (5) у остаточному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= \psi'_1 P_1 t - \frac{R_{x_1}}{m_k} t, \\ \dot{z}_1 &= \psi'_2 P_1 t - \frac{G_k}{m_k} t - \frac{R_{z_1}}{m_k} t, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\omega t \in [(2k-1)\pi, 2k\pi], \quad k=1, 2, \dots$$

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \psi'_1 P_1 \frac{t^2}{2} - \frac{R_{x_1} t^2}{2m_k} + x_{10}, \\ z_1 &= \psi'_2 P_1 \frac{t^2}{2} - \frac{G_k t^2}{2m_k} - \frac{R_{z_1} t^2}{2m_k} - \frac{1}{3} h_k, \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$\omega t \in [(2k-1)\pi, 2k\pi], \quad k=1, 2, \dots$$

Системи рівнянь (17) та (18) відповідно описують закони зміни швидкості і переміщення центра мас коренеплоду у процесі його безпосереднього вилучення з ґрунту при відсутності дії збурюючої сили.

Складемо далі диференціальне рівняння повороту коренеплоду навколо його центра мас, або навколо умовної осі Cy_c , яка проходить через центр мас (точку C) паралельно осі $O_y y_1$. Згідно [8], зазначене рівняння у загальному вигляді буде мати такий вид:

$$I_{y_c} \frac{d^2 \theta}{dt^2} = M_{y_c}^e, \quad (19)$$

де θ – кут повороту коренеплоду навколо осі Cy_c ; I_{y_c} – момент інерції коренеплоду відносно осі Cy_c ; $M_{y_c}^e$ – обертальний момент навколо осі Cy_c (сума моментів усіх зовнішніх сил, що діють на коренеплід, відносно осі Cy_c).

Момент інерції I_{y_c} коренеплоду відносно осі Cy_c визначається згідно [8]:

$$I_{y_c} = \left(\frac{3}{80} + \frac{3}{20} t g^2 \varepsilon \right) m_k h_k^2. \quad (20)$$

Підставляючи вирази (2), (20) у диференціальне рівняння (19) і виконуючи необхідні перетворення, отримуємо диференціальне рівняння повороту коренеплоду навколо осі Cy_c :

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{3}{80} + \frac{3}{20} t g^2 \varepsilon \right) m_k h_k^2 \frac{d^2 \theta}{dt^2} = -H(-h_k + h - z_1) \sin \theta \sin \omega t + 2P_1 \cos \theta (-h_k + h - z_1) + \\
& + 2 \left(\frac{1}{2} f H \cos \delta \sin \omega t + f P_1 \sin \gamma \right) \sin(\gamma + \alpha_{k1 \max} \sin \omega t) \cos \varepsilon (-h_k + h - z_1) \sin \theta + \\
& + 2 \left(\frac{1}{2} f H \cos \delta \sin \omega t + f P_1 \sin \gamma \right) \cos(\gamma + \alpha_{k1 \max} \sin \omega t) \cos \gamma (-h_k + h - z_1) \cos \theta - \\
& - M, \\
& \omega t \in [2k\pi, (2k+1)\pi], \quad k = 0, 1, 2, \dots
\end{aligned} \tag{21}$$

Диференціальне рівняння повороту коренеплоду навколо осі Sy_c при звичайному вилученні (тобто при відсутності збурюючої сили):

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{3}{80} + \frac{3}{20} t g^2 \varepsilon \right) m_k h_k^2 \frac{d^2 \theta}{dt^2} = 2P_1 \cos \theta (-h_k + h - z_1) + 2f P_1 \sin^2 \gamma \times \\
& \times \cos \varepsilon (-h_k + h - z_1) \sin \theta + f P_1 \sin 2\gamma \cos \gamma (-h_k + h - z_1) \cos \theta - M, \tag{22}
\end{aligned}$$

$$\omega t \in [(2k-1)\pi, 2k\pi], \quad k = 1, 2, \dots$$

Проаналізуємо отримані диференціальні рівняння (21) і (22). Диференціальне рівняння (21) є нелінійним. Розв'язати його можна наближеними чисельними методами з застосуванням ПЕОМ, причому для кожного кроку застосування чисельного алгоритму значення z_1 необхідно знаходити з другого рівняння системи (13) для відповідного моменту часу t_k . Диференціальне рівняння (22) через входження в нього величини z_1 , яка є змінною, також є нелінійним, і для кожного моменту часу t_k згадану величину z_1 необхідно визначати з другого рівняння системи (18).

Таким чином, остаточно можна вважати, що побудована математична модель процесу безпосереднього вилучення коренеплоду цукрового буряку з ґрунту при вібраційному його викопуванні. Отримані результати дають можливість визначати кінематичні режими вібраційного викопування коренеплодів з умов їхнього непошкодження та конструктивні параметри вібраційних викопуючих органів.

Висновки. 1. Складені дві системи диференціальних рівнянь, що описують плоскопаралельний рух коренеплоду у ґрунті при його безпосередньому вилученні, який здійснюється під дією вертикальної збурюючої сили, що надається коренеплоду від вібраційного викопуючого органу, та тягового зусилля, що виникає внаслідок поступального руху копача.

2. Розв'язок даних диференціальних рівнянь надає можливість

знаходити закон руху коренеплоду у повздовжньо-вертикальній площині при безпосередньому вилученні з ґрунту.

3. Отримані результати дають також можливість визначати кінематичні режими вібраційного викопування коренеплодів з умов їхнього непошкодження та знаходити раціональні конструктивні параметри вібраційних викопуючих робочих органів.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. *Василенко П.М., Погорельий Л.В., Брей В.В.* Вибрационный способ уборки корнеплодов // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства, 1970. – №2. – С.9 – 13.
2. *Свеклоуборочные* машины (конструирование и расчет) // Л.В. Погорельий, Н.В. Татьяна, В.В. Брей и др.; под общ. ред. Л.В. Погорелого. – К.: Техніка, 1983. – 168 с.
3. *Булгаков В.М., Головач І.В., Войтюк Д.Г.* Теорія вібраційного викопування коренеплодів. – Збірник наукових праць Національного аграрного університету “Механізація сільськогосподарського виробництва”, 2003, Т. XIV. – С. 34 – 86.
4. *Булгаков В.М., Головач І.В., Войтюк Д.Г.* Теорія поперечних коливань коренеплоду при вібраційному викопуванні. – Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь, 2004. – Вип. 18. – С. 8 – 24.
5. *Булгаков В.М., Головач І.В.* Про вимушені поперечні коливання тіла коренеплоду при вібраційному викопуванні. – Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Збірник наукових праць. – Харків: ХНТУСГ, 2005. – Вип. 39. – С. 23 – 39.
6. *В. Булгаков, І. Головач.* Розробка математичної моделі вилучення коренеплоду з ґрунту // Техніка АПК. – 2006. – №6-7. – С. 36 – 38; – №8. – С. 25-28; – №9-10. – С. 47 – 49.
7. *Булгаков В.М., Головач І.В.* Уточнена теорія викопуючого робочого органу лемішного типу // Вісник аграрної науки Причорномор’я. Спеціальний випуск 4(18). Т. I. – Миколаїв: МДАУ, 2002. – С. 37–63.
8. *Бутенин Н.В., Луниц Я.Л., Меркин Д.Р.* Курс теоретической механики. Т. II. Динамика. – М.: Наука, 1985. – 496 с.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВИБРАЦИОННОГО ВЫКАПЫВАНИЯ КОРНЕПЛОДА САХАРНОЙ СВЁКЛЫ

Построена новая математическая модель, описывающая процесс вибрационного выкапывания корнеплода сахарной свёклы, осуществляемый под действием вертикальной возмущающей силы и тягового усилия, передающегося ему от вибрационного выкапывающего рабочего органа. Получены системы дифференциальных уравнений, решение которых дало возможность определить закон движения корнеплода в процессе его непосредственного вибрационного извлечения.

Ключевые слова: корнеплод, выкапывающий рабочий орган, вибрационный процесс, математическая модель, возмущающая сила, дифференциальные уравнения.

MATHEMATICAL MODEL OF VIBRATIONAL DIGGING UP OF THE SUGAR BEET ROOT CROP

New mathematical model presenting process of vibrational digging up of a sugar beet root crop, carried out under the influence of a vertical disturbing force and a tractive force transmitted to it from the vibrational digging out tool is built. Systems of the differential equations which solution has given the chance to define the law of driving of the root crop in the course of its direct vibrational extraction are derived.

Key words: root crop, vibrational digging out tool, vibrational process, mathematical model, disturbing force, differential equations.

УДК 631.356.2

ДО МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ СТУПЕНЯ ПРОСЮВАННЯ ҐРУНТУ З ОБ'ЄМУ ВОРОХУ КОРЕНЕПЛОДІВ ПІД ЧАС НАВАНТАЖЕННЯ ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ КОВШЕМ З РУХОМИМИ ГРАБЛИНАМИ

В.Г. Присяжний, канд. техн. наук
ННЦ «ІМЕСГ»

Приведена методика визначення ступеня просювання ґрунту з об'єму вороху корнеплодів під час навантаження решітчастим ковшем з рухомими граблями, яка враховує пошарове розміщення цукрових буряків.

Ключові слова: ступінь просювання, ворох корнеплодів, рухомі граблі, розмах коливань, частота коливань.

© В.Г. Присяжний.

Механізація та електрифікація сільського господарства. Вип. 96. 2012.