**Булгаков В. М.***Національна академія
аграрних наук України***Головач І. В.***Національний
університет
біоресурсів і
природокористування
України***Калетнік Г. М.****Кравченко І. Є.***Вінницький
національний
аграрний університет***УДК 631.356.2**

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЗАСТОСУВАННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ВИКОПУЮЧИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ БУРЯКОЗБИРАЛЬНИХ МАШИН

Аналитически определены амплитудно-частотные характеристики продольных и поперечных колебаний корнеплода как упругого тела закрепленного в почве и их влияние на повреждение корнеплодов при вибрационном выкапывании.

Amplitude-frequency characteristics longitudinal and transverse vibrations of root crop as the elastic body fixed in soil, and their influence on damage of root crops are analytically defined at vibrational excavation.

Проблема. Вібраційне викопування коренеплодів цукрових буряків набуло широкого розповсюдження у багатьох бурякосійних країнах, оскільки має ряд переваг в порівнянні з іншими способами викопування. Проте і досі теоретично не обґрунтовано, якому з напрямків дії збуруючої сили, вертикальному чи горизонтальному (тобто вздовж вертикальної осі коренеплоду, чи перпендикулярно до неї) надавати перевагу при вібраційному викопуванні коренеплодів з погляду їх непошкодження зокрема не обламування хвостової частини. А тому виникає необхідність теоретично дослідити дану проблему, а саме, провести порівняльну оцінку вилування вертикальної і горизонтальної збуруючої сили, що надається від вібраційного викопуючого робочого органу, на пошкодження коренеплодів цукрових буряків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фундаментальні теоретичні дослідження поздовжніх і поперечних коливань коренеплоду як пружного тіла, закріпленого у ґрунті, що відбуваються під дією вертикальної і горизонтальної збуруючої сили, здійснені у працях [1 – 4]. Результати експериментальних досліджень у даному напрямку наведені у фундаментальних працях [5] і [6]. Однак порівняльної оцінки, яким з коливань, поздовжнім чи поперечним, слід надати перевагу, у вище зазначених працях не наведено.

Мета дослідження. На підставі теоретичних досліджень поздовжніх і поперечних коливань коренеплоду цукрового

буряку, як пружного тіла, закріпленого у ґрунті, оцінити вплив амплітудно-частотних характеристик зазначених коливань на пошкодження коренеплодів та визначити, якому з вказаних коливань надати перевагу при конструюванні вібраційних викопуючих робочих органів бурякозбиральних машин сучасного технічного рівня.

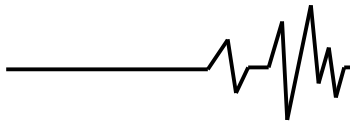
Результати досліджень. При вібраційному викопуванні коренеплодів важливу роль відіграє стан ґрунту, зокрема його пружні властивості. Тому у даній роботі проаналізовано вплив коефіцієнта пружної деформації ґрунту [7], на амплітудно-частотні характеристики коливального процесу коренеплодів цукрових буряків при їх вібраційному викопуванні. З цією метою уточнені вирази функціоналів Остроградського-Гамільтона, які наведені у опублікованих раніше роботах [1 – 4]. Ці функціонали описують коливальні процеси, які здійснюють коренеплоди цукрового буряку при вібраційному їх викопуванні з ґрунту.

Розглянемо спочатку поздовжні коливання коренеплоду цукрового буряку як пружного тіла, закріпленого у ґрунті, які відбуваються під дією гармонічної збуруючої сили згідно такого закону

$$Q_{\text{св}} = H \sin \omega t, \quad (1)$$

де H - амплітуда збуруючої сили, ω - колова частота збуруючої сили.

Будемо вважати коренеплід цукрового буряку, що знаходиться у ґрунті, стрижнем змінного поперечного перерізу по довжині з



одним закріпленим нижнім кінцем. Як показано на схемі (рис. 1), коренеплід цукрового буряку являє собою конусоподібне тіло, кут при вершині якого дорівнює $2\gamma_k$, а верхня частина знаходиться дещо вище рівня поверхні ґрунту. О - точка умовного закріплення коренеплоду у ґрунті.

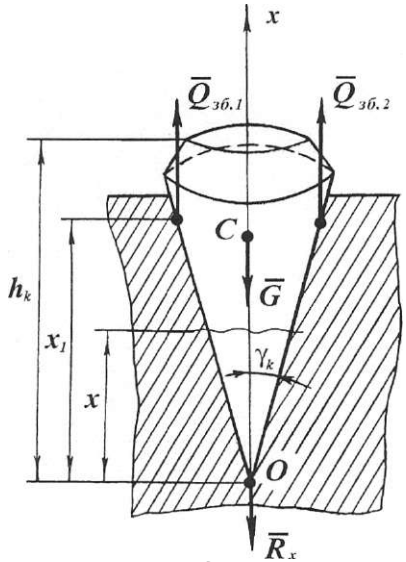


Рис. 1. Схема сил, які діють на коренеплід в момент захвату вібраційним викопуючим робочим органом

В центрі ваги (точка С), прикладена сила \bar{G} – вага коренеплоду. Крізь вісь симетрії коренеплоду проведена вертикальна вісь x , початок якої співпадає з точкою О. Зв'язок коренеплоду з ґрунтом визначається загальною реакцією ґрунту \bar{R}_x , яка розташована вздовж осі x . Збуруюча сила $\bar{Q}_{зб.}$ прикладається до коренеплоду відразу від двох викопуючих лемешів з обох його боків, а тому на схемі вона представлена двома складовими $\bar{Q}_{зб.1}$ та $\bar{Q}_{зб.2}$. Дані сили прикладені на відстані x_1 від початку координат (точки О) і саме вони викликають коливання коренеплоду у поздовжньо-вертикальній площині, які руйнують зв'язки коренеплоду з ґрунтом і створюють для останнього умови вилучення з ґрунту.

Колівання коренеплоду у поздовжньо-вертикальній площині можуть бути аналітично описані за допомогою функціонала Остроградського-Гамільтона, який в даному випадку має такий вигляд:

$$S = \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} \int_0^{h_k} \left\{ \rho \pi x^2 t g^2 \gamma_k \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right)^2 - E \pi x^2 t g^2 \gamma_k \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 + H \sin \omega t \sigma_1(x - x_1) y(x, t) - 2 \pi c x t g \gamma_k y^2(x, t) \right\} dx dt, \quad (2)$$

де $\sigma_1(x)$ - функція Дірака; ρ - густина коренеплоду, кг/м^3 ; x - відстань поперечного перерізу коренеплоду від точки закріплення, м; h_k - довжина коренеплоду, м; $2\gamma_k$ - кут конусності коренеплоду, град.; E - модуль Юнга для матеріалу коренеплоду, Н/м^2 ; $y(x, t)$ - поздовжнє зміщення будь-якого поперечного перерізу коренеплоду в момент часу t , м; c - коефіцієнт пружної деформації ґрунту, Н/м^3 ; x_1 - координата точки захвату коренеплоду робочим органом, м.

Вільні гармонічні поздовжні коливання коренеплоду були знайдені у вигляді:

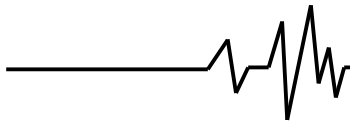
$$y(x, t) = \varphi(x) \sin(pt + \alpha) \quad (3)$$

де $\varphi(x)$ – власна форма головних коливань, тобто функція, яка визначає неперервну сукупність амплітудних поздовжніх відхилень поперечних перерізів коренеплоду від їх положень рівноваги, м; p - власна колова частота головних коливань тіла коренеплоду, с^{-1} .

Для знаходження власних форм і частот поздовжніх коливань тіла коренеплоду у ґрунті використано метод Рітца, який відноситься до прямих методів варіаційного числення.

Після застосування метода Рітца отримано рівняння частот для поздовжніх коливань коренеплоду, закріпленого у ґрунті:

$$\begin{vmatrix} p^2 T_{11} - U_{11} - C_{11} & p^2 T_{12} - U_{12} - C_{12} \dots & p^2 T_{1n} - U_{1n} - C_{1n} \\ p^2 T_{21} - U_{21} - C_{21} & p^2 T_{22} - U_{22} - C_{22} \dots & p^2 T_{2n} - U_{2n} - C_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ p^2 T_{n1} - U_{n1} - C_{n1} & p^2 T_{n2} - U_{n2} - C_{n2} & p^2 T_{nn} - U_{nn} - C_{nn} \end{vmatrix} = 0, \quad (4)$$



$$T_{ik} = \int_0^{h_k} \rho \pi x^2 t g^2 \gamma_k \psi_i(x) \psi_k(x) dx;$$

$$U_{ik} = \int_0^{h_k} E \pi x^2 t g^2 \gamma_k \psi_i'(x) \psi_k'(x) dx;$$

$$C_{ik} = \int_0^{h_k} 2 \pi c x t g \gamma_k \psi_i(x) \psi_k(x) dx;$$

$(i, k = 1, 2, \dots, n)$; $\psi_i(x)$ – базисні функції, які спеціально вибираються і є відомими функціями, що задовольняють геометричним граничним умовам задачі.

Оскільки рівняння (4) є рівнянням n -го степеня відносно p^2 , то його розв'язок

визначає наступну послідовність власних частот $p_1^2 < p_2^2 < \dots < p_n^2$.

На підставі рівняння частота Рітца в середовищі MathCAD обчислюємо значення першої (основної) та другої частот власних поздовжніх коливань тіла коренеплоду в залежності від значення коефіцієнта c пружної деформації ґрунту. Згідно [7] приймаємо $c = 0 \dots 2 \cdot 10^6$ Н/м³.

На базі одержаних результатів розрахунків побудовані графічні залежності першої та другої частоти від значення коефіцієнта c пружної деформації ґрунту (рис. 2, 3).

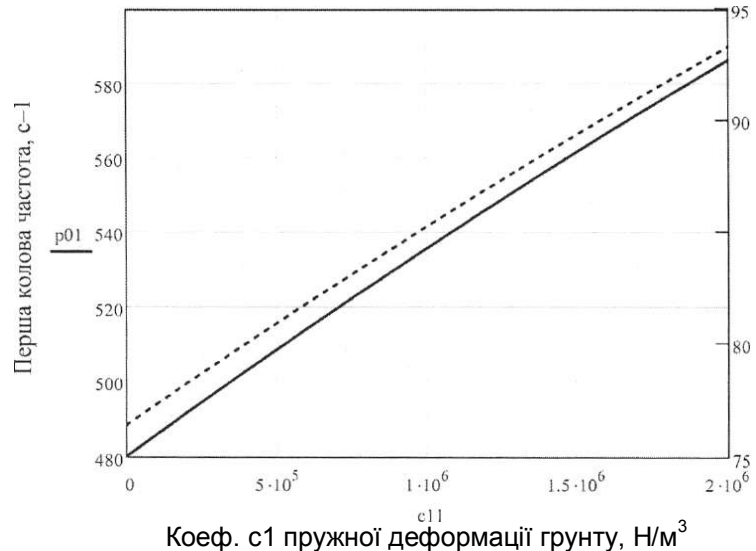


Рис. 2. Залежність першої власної частоти повздовжніх коливань тіла коренеплоду від коефіцієнта c пружної деформації ґрунту

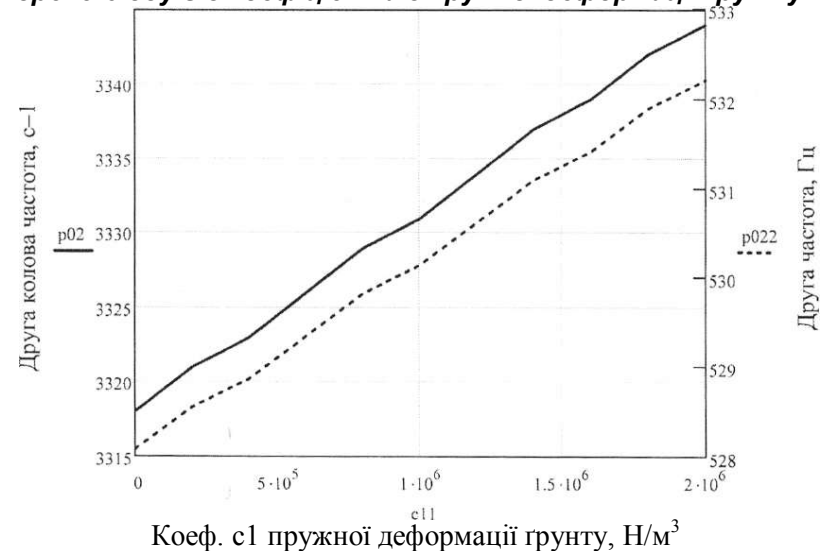
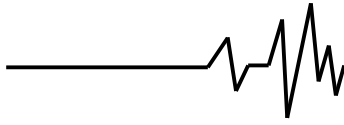


Рис. 3. Залежність другої власної частоти повздовжніх коливань тіла коренеплоду від коефіцієнта c пружної деформації ґрунту



Як видно з наведеного графіка (рис. 2), при зміні значень коефіцієнта c пружної деформації ґрунту в межах $c = 0 \dots 2 \cdot 10^6$ Н/м³ значення першої колової частоти монотонно зростає в межах $p_1 = 480 \dots 587$ с⁻¹, або першої частоти в герцах – в межах 76,4...93,4 Гц.

З графіка (рис. 3) видно, що друга частота власних коливань при зміні коефіцієнта c пружної деформації ґрунту в межах $c = 0 \dots 2 \cdot 10^6$ Н/м³ змінюється в незначних межах: колова частота відповідно становить $p_2 = 3318 \dots 3344$ с⁻¹, або частота в герцах – 528...532 Гц.

Для визначення амплітуди та закону змушених поздовжніх коливань також застосуємо до функціоналу (2) метод Рітца. Згідно даного методу приймаємо що змушені поздовжні коливання відбуваються згідно закону

$$y(x, t) = \varphi(x) \sin \omega t, \quad (5)$$

де $\varphi(x)$ – форма (амплітуда) змушених поздовжніх коливань.

Згідно [8] форму змушених поздовжніх коливань тіла коренеплоду шукаємо у наступному вигляді:

$$\varphi(x) = \alpha \psi(x), \quad (6)$$

де – α шуканий параметр, $\psi(x)$ – базисна функція.

Прийmemo за базисну функцію $\psi(x)$ форму змушених поздовжніх коливань стрижня постійного поперечного перерізу з одним жорстко закріпленим кінцем, що виникають під дією поздовжньої гармонічної сили частоти ω , прикладеної в точці $x = x_1$.

Згідно [8] форма змушених коливань згаданого стрижня має такий вигляд:

$$\psi(x) = D_1 \sin ax \quad \text{при } x \leq x_1, \quad (7)$$

$$\psi(x) = D_2 \cos a(h_k - x) \quad \text{при } x > x_1 \quad (8)$$

де $D_1 = -\frac{1}{aEF} \frac{\cos a(h_k - x_1)}{\cos ah_k}$;

$$D_2 = -\frac{1}{aEF} \frac{\sin ax_1}{\cos ah_k}; \quad a = \omega \sqrt{\frac{\mu}{EF}}; \quad \mu -$$

погонна маса стрижня, кг/м; F - площа поперечного перерізу стрижня, м²; E - модуль Юнга для матеріалу стрижня, Н/м²; h_k -

довжина стрижня, м; ω – колова частота змушених коливань стрижня, с⁻¹.

В результаті застосування метода Рітца отримані вирази для форми (амплітуди) змушених поздовжніх коливань коренеплоду, закріпленого у ґрунті:

$$\varphi(x) = \alpha D_1 \sin ax \quad \text{при } x \leq x_1;$$

$$\varphi(x) = \alpha D_2 \cos a(h_k - x) \quad \text{при } x > x_1, \quad (9)$$

де α - отриманий за методом Рітца коефіцієнт, при якому функціонал (2) має стаціонарне значення і залежить від пружних властивостей c ґрунту, частоти коливань робочого органу ω , та параметрів ρ , h_k , y_k , E тіла коренеплоду.

Чисельний розрахунок проведений на ПЕОМ в середовищі MathCAD з метою визначення залежності амплітуди змушених поздовжніх коливань тіла коренеплоду від коефіцієнта c пружної деформації ґрунту, що оточує коренеплід, та відстані поперечного перерізу коренеплоду від умовної точки закріплення для частоти збурюючої сили $\nu = 20$ Гц. За результатами розрахунку одержано графіки (рис. 4).

Як видно з наведених графіків, зі збільшенням коефіцієнта c пружної деформації оточуючого ґрунту амплітуда змушених коливань коренеплоду зменшується, зі збільшенням відстані x поперечного перерізу коренеплоду від точки умовного закріплення при $x \leq x_1$ зростає, а при $x \geq x_1$ майже не змінюється ($x_1 = 0,15$ м – точка захвату коренеплоду).

Так, в результаті розрахунків одержано, що при $x = 0,07$ м і зміні коефіцієнта c в межах

$c = 0 \dots 2 \cdot 10^6$ Н/м³, амплітуда змінюється в межах 0,7...0,47 мм; при $x = 0,1$ м – в межах 0,99...0,67 мм; при $x = 0,12$ м – в межах 1,19...0,81 мм; при $x = 0,15$ м (точка захвату) – в межах 1,49... 1,01 мм.

Отримані значення частот власних поздовжніх коливань і амплітуд змушених поздовжніх коливань тіла коренеплоду сприяють процесу струшування налиплого ґрунту з поверхні коренеплодів, причому при таких значеннях амплітуд розрив коренеплоду малоімовірний.

Далі розглянемо випадок, коли напрямок дії збурюючої сили співпадає з напрямком поступального руху вібраційного викопуючого робочого органу. При цьому збурююча сила спрямована перпендикулярно до вертикальної осі коренеплоду, а отже викликає поперечні його коливання як пружного тіла у пружному середовищі.

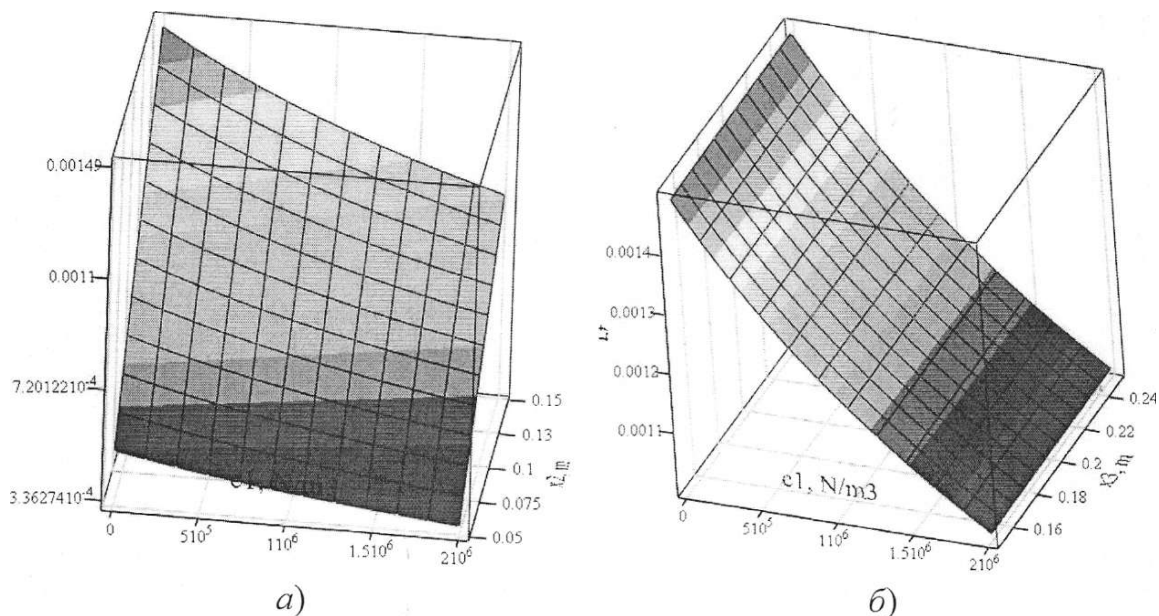
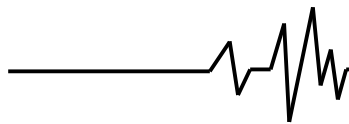


Рис. 4. Залежність амплітуди змушених поздовжніх коливань коренеплоду як пружного тіла, закріпленого у ґрунті, від коефіцієнта с пружної деформації оточуючого ґрунту та відстані x поперечного перерізу коренеплоду від умовної точки закріплення:
a – $x = 0 \dots 0,15$ м; *б* – $x = 0,15 \dots 0,25$ м; (амплітуда збурюючої сили $H = 500$ Н, частота збурюючої сили $\nu = 20$ Гц)

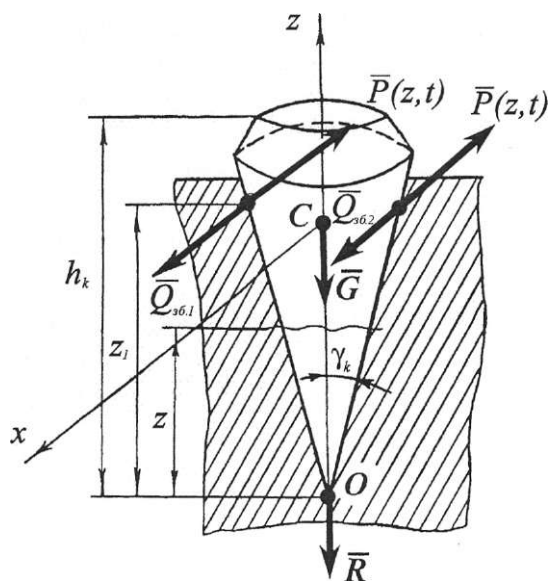
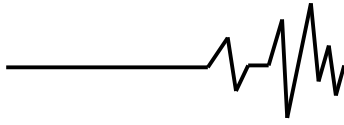


Рис. 5. Еквівалентна схема поперечних коливань тіла коренеплоду в момент захвату вібраційним викопуючим робочим органом

Еквівалентну схему силової взаємодії робочого органу з коренеплодом цукрового буряка у випадку поперечних коливань коренеплоду показано на рис. 5. Тут $\bar{P}(z, t)$ позначено інтенсивність розподіленого

навантаження опору ґрунту, \bar{R} – сила зв'язку коренеплоду цукрового буряка з ґрунтом. Функціонал Остроградського-Гамільтона для поперечних коливань коренеплоду має такий вигляд:

$$S = \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} \int_0^{h_k} \left\{ \rho \pi z^2 t g^2 \gamma_k \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right)^2 - E \frac{\pi z^4 t g^2 \gamma_k}{4} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial z^2} \right)^2 + H \sin \omega t \sigma_1 (z - z_1) y(z, t) - 2 \pi c z t g \gamma_k y^2(z, t) \right\} dz dt, \quad (10)$$



де $y(z, t)$ – відхилення точок осі коренеплоду при поперечних коливаннях, м.

Вільні гармонічні поперечні коливання тіла коренеплоду були знайдені у вигляді:

$$y(z, t) = \varphi(z) \sin(pt + \alpha), \quad (11)$$

де $\varphi(z)$ - власна форма головних поперечних коливань, м; p - власна колова частота поперечних коливань, c^{-1} .

Для знаходження власних форм і частот поперечних коливань коренеплоду у ґрунті також застосовано метод Рітца. Отримано рівняння частот Рітца у наступному вигляді:

$$\begin{vmatrix} p^2 T_{11} - U_{11} - C_{11} & p^2 T_{12} - U_{12} - C_{12} \dots & p^2 T_{1n} - U_{1n} - C_{1n} \\ p^2 T_{21} - U_{21} - C_{21} & p^2 T_{22} - U_{22} - C_{22} \dots & p^2 T_{2n} - U_{2n} - C_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ p^2 T_{n1} - U_{n1} - C_{n1} & p^2 T_{n2} - U_{n2} - C_{n2} & p^2 T_{nn} - U_{nn} - C_{nn} \end{vmatrix} = 0, \quad (12)$$

$$\text{де: } T_{ik} = \rho \pi t g^2 \gamma_k \int_0^{h_k} \left[U(k_i z) - \frac{S(k_i h_k)}{T(k_i h_k)} V(k_i z) \right] \left[U(k_k z) - \frac{S(k_k h_k)}{T(k_k h_k)} V(k_k z) \right] z^2 dz;$$

$$U_{ik} = \frac{\pi E t g^4 \gamma_k}{4} \int_0^{h_k} k_i^2 k_k^2 \left[S(k_i z) - \frac{S(k_i h_k)}{T(k_i h_k)} T(k_i z) \right] \left[S(k_k z) - \frac{S(k_k h_k)}{T(k_k h_k)} T(k_k z) \right] z^4 dz;$$

$$C_{ik} = c \pi t g \gamma_k \int_0^{h_k} \left[U(k_i z) - \frac{S(k_i h_k)}{T(k_i h_k)} V(k_i z) \right] \left[U(k_k z) - \frac{S(k_k h_k)}{T(k_k h_k)} V(k_k z) \right] z dz;$$

$i, k=1, 2, \dots, n$;

$U(z), S(z), T(z), V(z)$ – функції Крилова, тобто:

$$U(z) = \frac{1}{2}(ch kz - \cos kz); \quad S(z) = \frac{1}{2}(ch kz + \cos kz); \quad T(z) = \frac{1}{2}(sh kz - \sin kz);$$

$$V(z) = \frac{1}{2}(sh kz - \sin kz);$$

$$k_i h_k - \text{корені рівняння } chkh_k \cos kh_k + 1 = 0,$$

причому перші два корені зазначеного рівняння дорівнюють: $k_1 h_k = 1,875$; $k_2 h_k = 4,694$.

На базі чисельних розрахунків на ПЕОМ у середовищі MathCAD побудовані графічні залежності першої та другої частоти власних поперечних коливань тіла коренеплоду цукрового буряка від значення коефіцієнта c пружної деформації ґрунту (рис. 6, 7).

Як видно з графіка (рис. 6), при зміні значень коефіцієнта c пружної деформації ґрунту в межах $c = 0 \dots 2 \cdot 10^6$ Н/м³ значення першої колової частоти монотонно зростає в межах $p_1 = 35,6 \dots 226,5$ с⁻¹, або 5,7...36,0 Гц. Отже, перша частота власних поперечних коливань тіла коренеплоду цукрового буряка істотно зростає при збільшенні коефіцієнта c пружної деформації оточуючого його ґрунту.

Як видно з графіка (рис. 7), друга частота власних поперечних коливань при зміні коефіцієнта c пружної деформації ґрунту в межах $c = 0 \dots 2 \cdot 10^6$ Н/м³ змінюється в незначних межах: колова частота відповідно становить $p_2 = 1744 \dots 1764$ с⁻¹, або частота в герцах – 277,6...280,7 Гц.

Отримане розрахункове значення першої частоти узгоджується з експериментальними даними, наведеними у [5 – 7]. Така частота викликає інтенсивне руйнування зв'язків коренеплоду з ґрунтом та інтенсивне струшування ґрунту з поверхні коренеплоду цукрового буряка.

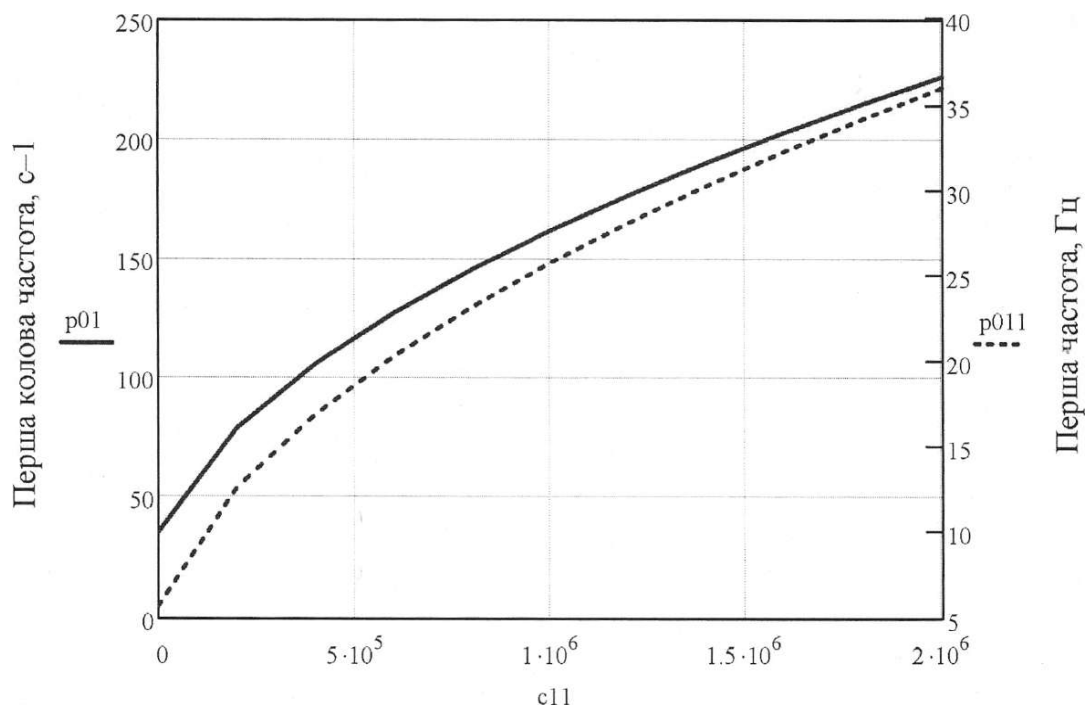
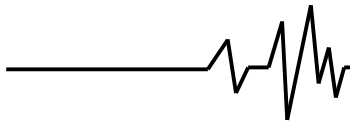
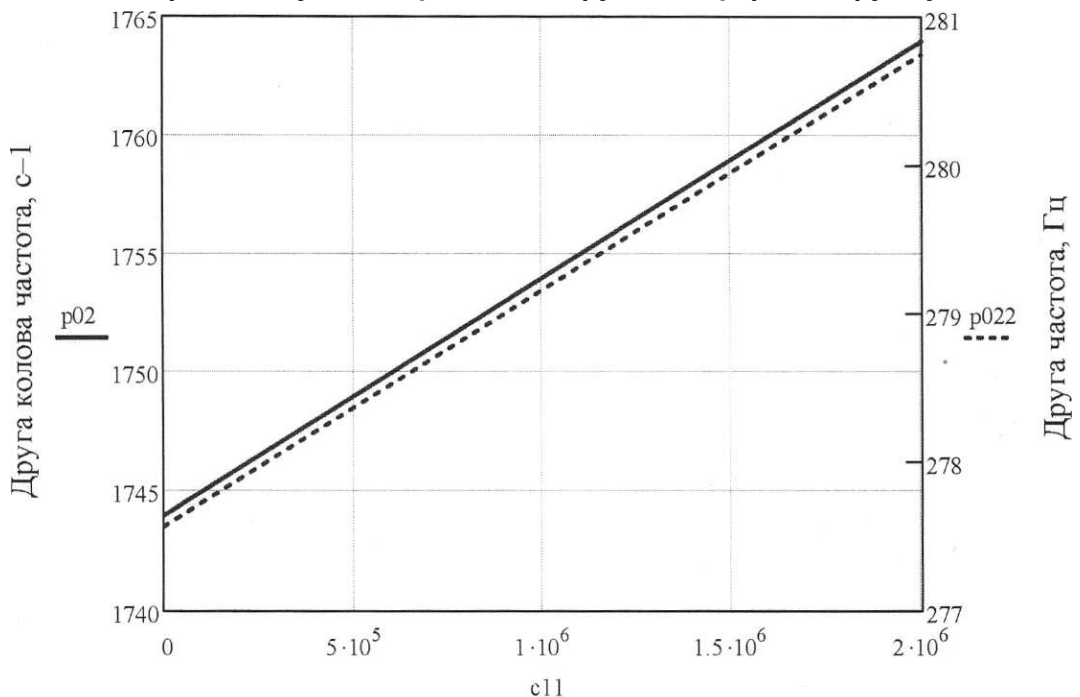


Рис. 6. Залежність першої власної частоти поперечних коливань тіла коренеплоду від коефіцієнта c пружної деформації ґрунту



Коеф. c_1 пружної деформації ґрунту, Н/м³

Рис. 7. Залежність другої власної частоти поперечних коливань тіла коренеплоду від коефіцієнта c пружної деформації ґрунту

Закон змушених поперечних коливань тіла коренеплоду будемо шукати у наступному вигляді

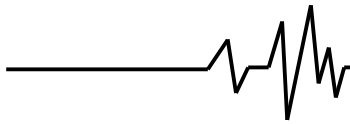
$$y(z, t) = \varphi(z) \sin \omega t, \quad (13)$$

де $\varphi(z)$ – форма (амплітуда) змушених поперечних коливань.

Амплітуду змушених коливань, згідно методу Рітца, шукатимемо у наступному вигляді:

$$\varphi(z) = \alpha \psi(z), \quad (14)$$

де α – шуканий параметр; $\psi(z)$ – базисна функція.



За базисну функцію $\psi(z)$ прийнято форму змушених поперечних коливань однорідного стрижня постійної жорсткості EJ з одним жорстко закріпленим кінцем, які виникають під дією поперечної одиничної гармонічної сили частоти ω , прикладеної у точці $z = z_1$. Згідно [8] дана форма має наступний вигляд:

$$\psi(z) = CU(kz) + DV(kz), \quad 0 \leq z \leq z_1$$

$$\psi(z) = CU(kz) + DV(kz) + \frac{1}{k^3 EJ} V[k(z - z_1)],$$

$$z_1 \leq z \leq h_k \quad (15)$$

де $U(kz), V(kz)$ – функції Кривога;

$$k = \sqrt[4]{\frac{\mu \omega^2}{EJ}}; \quad \mu - \text{погонна маса стрижня, кг/м;}$$

C, D - довільні сталі, які визначаються з наступних граничних умов:

$$y(0) = y'(0) = 0; \quad y''(h_k) = y'''(h_k) = 0 \quad (16)$$

В результаті отримано вирази для форми (амплітуди) змушених поперечних коливань тіла коренеплоду закріпленого у ґрунті, такого вигляду:

$$\varphi(z) = \alpha [BU(kz) - GV(kz)], \quad 0 \leq z \leq z_1$$

$$\varphi(z) = \alpha \{-KV[k(z - z_1)] + BU(kz) - GV(kz)\},$$

$$z_1 \leq z \leq h_k, \quad (17)$$

де α - коефіцієнт, при якому функціонал має стаціонарне значення і який залежить від пружних властивостей с ґрунту, частоти коливань робочого органу ω , та параметрів $\rho, h_k, \gamma_k, E, J$ коренеплоду;

$$B = \frac{T[k(h_k - z_1)]S(kh_k) - T(kh_k)S[k(h_k - z_1)]}{\Delta k^3 EJ},$$

$$G = \frac{T[k(h_k - z_1)]V(kh_k) - S[k(h_k - z_1)]S(kh_k)}{\Delta k^3 EJ},$$

$$K = \frac{S^2(kh_k) - T(kh_k)V(kh_k)}{\Delta k^3 EJ}$$

Чисельний розрахунок проведено на ПЕОМ у середовищі MathCAD Отримані залежності амплітуди змушених поперечних коливань тіла коренеплоду від коефіцієнта с пружної деформації ґрунту та відстані z поперечного перерізу коренеплоду від умовної точки закріплення (рис. 8, а і б).

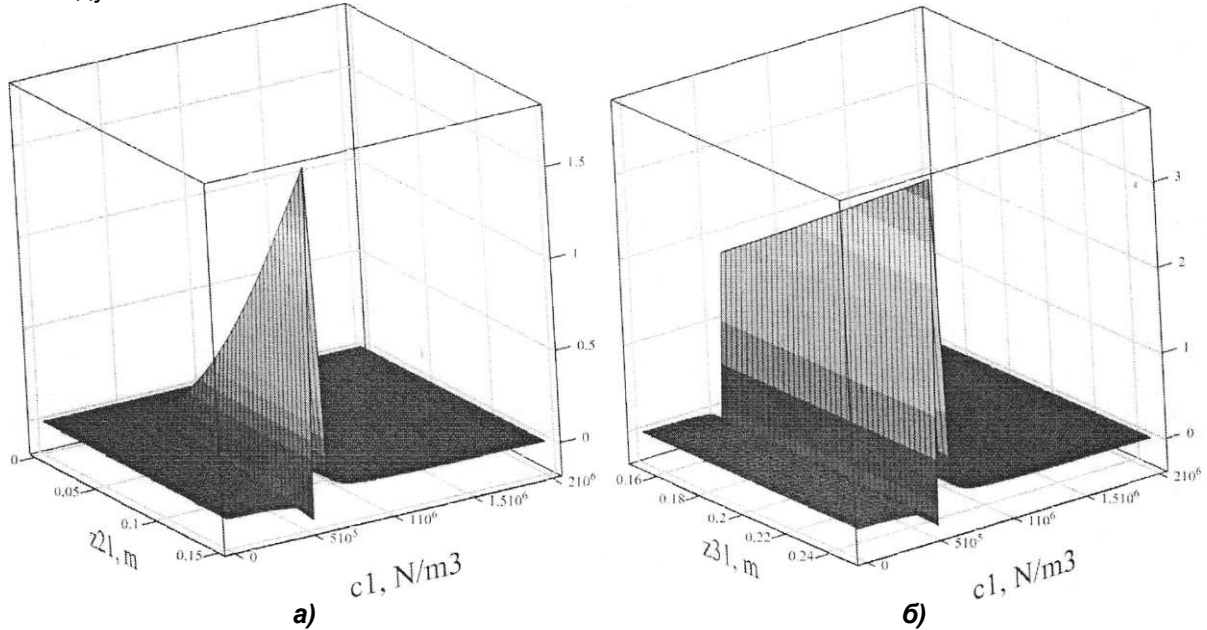
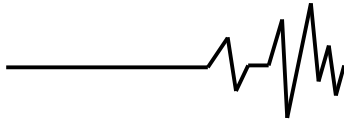


Рис. 8. Залежність амплітуди змушених поперечних коливань тіла коренеплоду від коефіцієнта пружної деформації ґрунту с та відстані z поперечного перерізу коренеплоду до умовної точки закріплення: а – $z = 0 \dots 0,15$ м; б – $z = 0 \dots 0,25$ м; (амплітуда збурюючої сили $H = 500$ Н, частота збурюючої сили $\nu = 20$ Гц)

Як видно з наведених графіків (рис. 8), амплітуда змушених поперечних коливань тіла коренеплоду різко зростає при $c = 5,5 \cdot 10^5 \dots 6 \cdot 10^5$ Н/м³. Це якраз ті значення

коефіцієнта с пружної деформації ґрунту, при яких перша частота власних коливань коренеплоду знаходиться в околі $p_1 = 20$ Гц.



Таким чином, при указаному діапазоні значень коефіцієнта c пружної деформації ґрунту та частоті змушених коливань $\nu = 20$ Гц спостерігається резонанс і амплітуда може сягати значення понад 0,3 м. Це, звичайно, призведе до зламування коренеплоду, причому, як показують графіки (рис. 8), в межах режиму резонансу амплітуда різко зростає з віддаленням поперечного перерізу від умовної точки закріплення, особливо для поперечних перерізів, що знаходяться нижче точки захвату (рис. 8, а). При усіх інших значеннях коефіцієнта c пружної деформації ґрунту амплітуда мало залежить від відстані поперечного перерізу до умовної точки закріплення коренеплоду у ґрунті.

Аналогічні розрахунки проведено для частот збуруючої сили $\nu = 10$ Гц та $\nu = 15$ Гц. Як показують розрахунки, з ростом частоти резонанс має місце при більших значеннях коефіцієнта c . Так, при $\nu = 10$ Гц резонанс спостерігається при

$c = 1,5 \cdot 10^5 \dots 1,7 \cdot 10^5$ Н/м³; при $\nu = 15$ Гц – при $c = 3 \cdot 10^5 \dots 3,5 \cdot 10^5$ Н/м³; при $\nu = 20$ Гц – при $c = 5,5 \cdot 10^5 \dots 6 \cdot 10^5$ Н/м³.

Отже, у випадку, коли збуруюча сила діє перпендикулярно до осі коренеплоду цукрового буряка, може мати місце зламування коренеплоду при відповідних частотах збуруючої сили та коефіцієнті c пружної деформації ґрунту, на відміну від вертикальної збуруючої сили, коли коренеплід може розтягуватися не більше, ніж на 1,7 мм. Власні частоти поздовжніх коливань тіла коренеплоду знаходяться у межах 76,4...93,4 Гц, а частота збуруючої сили - не більше 20 Гц, тому резонанс неможливий. Отже, конструкції вібраційних викопуючих робочих органів мають бути орієнтовані на створення вертикальної збуруючої сили, а не горизонтальної.

Висновки

1. Створена теорія поздовжніх і поперечних коливань коренеплоду цукрового буряка як пружного тіла, закріпленого у ґрунті, на базі якої отримані значення першої та другої частоти власних поздовжніх і поперечних коливань в залежності від коефіцієнта пружної деформації ґрунту.

2. Визначені амплітуди змушених поздовжніх коливань тіла коренеплоду цукрового буряка. Причому при зміні коефіцієнта пружної деформації ґрунту в межах

$0 \dots 2 \cdot 10^6$ Н/м³ за частоти збуруючої сили 20 Гц та її амплітуди 500 Н амплітуда поздовжніх змушених коливань змінюється в межах 1,49...0,47 мм. Отже розрив коренеплоду цукрового буряка мало ймовірний.

3. Для поперечних коливань тіла коренеплоду при відповідних значеннях частот збуруючої сили та коефіцієнта пружної деформації ґрунту може мати місце резонанс, що призведе до зламування хвостової частини коренеплоду цукрового буряка.

4. При проектуванні вібраційних викопуючих робочих органів бурякозбиральних машин необхідно надавати перевагу конструкціям робочих органів з генерацією вертикальної збуруючої сили, а не горизонтальної.

Література

1. Василенко П.М., Погорельый Л.В., Брей В.В. Вибрационный способ уборки корнеплодов // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. - 1970. - №2. - С. 9-13.

2. Булгаков В.М., Головач І.В., Войтюк Д.Г. Теорія вібраційного викопування коренеплодів // Зб. наук. праць Нац. аграр. у-ту «Механізація сільськогосподарського виробництва». - К.: НАУ, 2003. - Т. XIV. - С. 34-86.

3. Булгаков В.М., Головач І.В., Войтюк Д.Г. Теорія поперечних коливань коренеплоду при вібраційному викопуванні // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. - Мелітополь: ТДАТА, 2004. - Вип. 18. - С. 8-24.

4. Булгаков В.М., Головач І.В. Про вимушені поперечні коливання тіла коренеплоду при вібраційному викопуванні // Вісник Харківського нац. техн. у-ту сільського господарства ім. Петра Василенка: Зб. наук. праць. - Харків: ХНТУСГ, 2005. - Вип. 39. - С. 23-39.

5. Свеклоубочные машины (конструирование и расчет) // Л.В. Погорельый, Н.В. Татьяна, В.В. Брей и др.; под общ. ред. Л.В. Погорелого. - К.: Техніка, 1983. - 168 с.

6. Погорельый Л.В., Татьяна Н.В. Свеклоуборочные машины (история, конструкция, теория, прогноз). - К.: Феникс, 2004. - 232 с.

7. Брей В. В. Исследование и разработка механизированного процесса извлечения из почвы корней сахарной свеклы. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. - К.: УСХА, 1972. - 196 с.

8. Бабаков И.М. Теория колебаний. - М.: Наука, 1968. - 560 с.