

# Механізація, електрифікація

УДК 631.356.02

© 2021

## ДИФЕРЕНЦІАЛЬНЕ РІВНЯННЯ РУХУ КОРЕНЕПЛОДУ ПРИ ЙОГО ВІБРАЦІЙНОМУ ВИКОПУВАННІ З ҐРУНТУ

В.М. Булгаков<sup>1</sup>, В.В. Адамчук<sup>2</sup>, І.В. Головач<sup>3</sup>,  
З.В. Ружило<sup>4</sup>, Є.І. Ігнат'єв<sup>5</sup>

<sup>1,2</sup>доктор технічних наук, професор, академік НААН

<sup>3</sup>доктор технічних наук, професор, чл.-кор. НААН

<sup>4,5</sup>кандидат технічних наук

<sup>1,3,4</sup>Національний університет біоресурсів і природокористування України  
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна

<sup>2</sup>Національний науковий центр «Інститут механізації та  
електрифікації сільського господарства, вул. Вокзальна, 11,  
смт. Глеваха, Васильківський р-н., Київська обл., 08631, Україна

<sup>5</sup>Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного,  
пр. Б. Хмельницького, 18, м. Мелітополь, Запорізька обл., 72312, Україна

e-mail: <sup>1</sup>vbulgakov@meta.ua, <sup>2</sup>vvadamchuk@gmail.com, <sup>3</sup>holovach.iv@gmail.com,  
<sup>4</sup>ruzhylo@nubip.edu.ua, <sup>5</sup>yeven.ihnatiev@tsatu.edu.ua

ORCID: <sup>1</sup>0000-0003-3445-3721, <sup>2</sup>0000-0003-0358-7946,

<sup>3</sup>0000-0003-1387-4789, <sup>5</sup>0000-0003-0315-1595

Надійшла 31.12.2020

**Мета.** Підвищення продуктивності та якості викопування коренеплодів буряків цукрових шляхом обґрунтування раціональних конструктивних і кінематичних параметрів вібраційного викопувального робочого органа. **Методи.** При проведенні теоретичних досліджень використано методи вищої математики, зокрема інтегрування диференціальних рівнянь, і теоретичної механіки — основного закону динаміки матеріальної точки. **Результати.** Складено еквівалентну схему силової взаємодії коренеплоду з робочими поверхнями вібраційного викопувального робочого органа, на підставі якої побудовано нову розрахункову математичну модель вібраційного вилучення коренеплоду буряку з ґрунту, а саме, отримано систему диференціальних рівнянь руху коренеплоду по робочих поверхнях лемешів при його вібраційному вилученні. Розв'язок даної системи диференціальних рівнянь на ПК дав змогу побудувати основні графічні залежності між конструктивними і кінематичними параметрами зазначеного технологічного процесу. **Висновки.** Отримано нові аналітичні залежності швидкості та переміщення коренеплоду в часі за напрямком поступального руху вібраційного викопувального робочого органа з урахуванням його конструктивних і кінема-

**тичних параметрів. За допомогою ПК побудовано залежності швидкості та переміщення коренеплоду в часі при його русі вгору в процесі вилучення з ґрунту з урахуванням конструктивних та кінематичних параметрів вібраційного викопувального робочого органа. При проведенні розрахунків було встановлено, що час вилучення коренеплоду з ґрунту становить 0,032 с.**

**Ключові слова:** буряки цукрові, леміш, вібраційне викопування, робочий орган, сила, диференціальні рівняння, конструктивні параметри.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202101-06>

Останнім часом використання вібраційних викопувальних робочих органів у бурякозбиральних машинах сучасного технічного рівня набуло широкого розповсюдження. Це зумовлено значно меншим їх тяговим опором, здатністю вилучати коренеплоди з ґрунту фактично без пошкоджень і втрат. При вібраційному викопуванні з поверхні коренеплодів інтенсивно струшується налиплий ґрунт, тобто відбувається їх інтенсивне очищення ще під час вилучення з ґрунту. Все це забезпечує високий рівень якості збирання буряків цукрових. Отже, наукові дослідження процесу вібраційного викопування з метою визначення раціональних конструктивних і кінематичних параметрів вібраційних викопувальних робочих органів є актуальним завданням галузі буряківництва.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Фундаментальні теоретичні та експериментальні дослідження вібраційного викопування коренеплодів цукрових буряків були опубліковані в роботі [1], в якій коренеплід моделюється як тіло, що має пружні властивості і його представлено стержнем змінного поперечного перерізу з одним закріпленим кінцем. Розглянуті в даній роботі поперечні коливання коренеплоду описуються за допомогою диференціального рівняння в частинних похідних четвертого порядку. Технологічний процес безпосереднього вилучення коренеплоду з ґрунту при вібраційному прикладанні сил тут фактично не розглядається, а лише вказується, що за допомогою додатково складених рівнянь кінетостатики знайдені умови його вилучення з ґрунту під дією збурювальної сили, що прикладена у поперечно-вертикальній площині. Вважається, що саме такий напрямок коливань буде найбільше сприяти

високоякісному викопуванню коренеплодів буряків цукрових.

У роботі [2] розроблено теорію викопувального робочого органа звичайного лемішного типу, де знайдено умову вилучення коренеплоду з ґрунту при поступальному русі копача з урахуванням умови непошкодження коренеплодів. У зазначеній роботі отримано вирази для визначення допустимої швидкості поступального руху викопувального робочого органа при заданих його конструктивних параметрах.

У роботі [3] розроблено теорію власних і вимушених позовжних коливань коренеплоду у ґрунті як пружного тіла, яка необхідна для оцінки впливу зазначених коливань на процес руйнування зв'язків коренеплоду з ґрунтом.

Особливості технологічного процесу і випробувань сучасних бурякозбиральних машин та їх робочих органів висвітлено у низці зарубіжних наукових досліджень [4–8]. Проте теоретичні розробки, спрямовані на підвищення якості викопування коренеплодів, ще не дали вичерпних результатів. Відтак наукові пошуки, присвячені обґрунтуванню раціональних конструктивних і кінематичних параметрів вібраційного викопувального робочого органа, наразі залишаються актуальними.

**Мета досліджень.** Підвищення продуктивності та якості викопування коренеплодів буряків цукрових шляхом обґрунтування раціональних конструктивних і кінематичних параметрів вібраційного викопувального робочого органа.

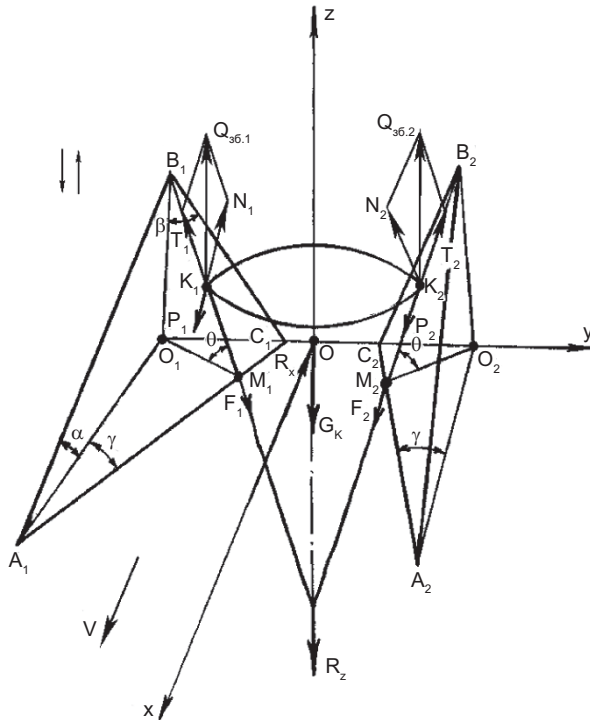
**Матеріали і методи досліджень.** При проведенні теоретичних досліджень використано методи вищої математики, зокрема інтегрування диференціальних рівнянь, і теоретичної механіки — основного закону динаміки матеріальної точки.

**Результати досліджень та їх аналіз.** Розглянемо процес викопування коренеплодів буряків цукрових лемішним копачем, який здійснює під дією вертикальної гармонічної збудовальної сили коливання, що передаються до лемешів від ексцентрикового механізму приводу.

Для дослідження зазначеного процесу складено еквівалентну схему взаємодії коренеплоду з робочими поверхнями вібраційного викопувального робочого органа. Для чого представимо вібраційний викопувальний робочий орган у вигляді двох клинів  $A_1B_1C_1$  і  $A_2B_2C_2$ , кожний з яких у просторі має нахил під кутами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  і які встановлено таким чином один до одного, що утворюється робоче русло, задня частина якого звужується (рис. 1). Зазначені клини здійснюють коливальний рух у поздовжньо-вертикальній площині, напрямком поступального руху вібраційного викопувального робочого органа показано стрілкою. Зв'яжемо з вібраційним викопувальним робочим органом

прямокутну декартову систему координат  $Oxyz$ , центр  $O$  якої знаходиться посередині звуженого русла копача, вісь  $Ox$  збігається з напрямком поступального руху копача, вісь  $Oz$  має напрямком вгору, а вісь  $Oy$  напрямлена у правий бік копача. Проекції точок  $B_1$  і  $B_2$  на вісь  $Oy$  позначимо точками  $O_1$  і  $O_2$  відповідно.

Вважається, що з поверхнями клинів  $A_1B_1C_1$  та  $A_2B_2C_2$  у відповідних двох точках  $K_1$  і  $K_2$  відбувається взаємодія коренеплоду, який апроксимується тілом конусоподібної форми, що перебуває всередині копача, власна вісь якого паралельна осі  $Oz$ . Прямі, проведені крізь точки контакту коренеплоду з площинами клинів  $A_1B_1C_1$  та  $A_2B_2C_2$  і точки  $B_1$  та  $B_2$ , утворюють на перетині зі сторонами клинів  $A_1C_1$  та  $A_2C_2$  відповідні точки  $M_1$  і  $M_2$ . Таким чином,  $\theta$  — це двогранний кут  $\angle B_1M_1O_1$  між нижньою основою  $A_1O_1C_1$  та робочою поверхнею клина  $A_1B_1C_1$ , або  $\angle B_2M_2O_2$  між нижньою основою  $A_2O_2C_2$  і робочою поверхнею клина  $A_2B_2C_2$ .



**Рис. 1.** Силова взаємодія коренеплоду буряка з клинами вібраційного викопувального робочого органа

Покажемо сили, які виникають внаслідок вказаної взаємодії коренеплоду з вібраційним викопувальним робочим органом. У точках контакту  $K_1$  і  $K_2$  коренеплоду з відповідними поверхнями клинів  $A_1B_1C_1$  та  $A_2B_2C_2$  діють вертикальні збурювальні сили  $\bar{Q}_{36.1}$  і  $\bar{Q}_{36.2}$  причому:

$$\bar{Q}_{36.1} = \bar{Q}_{36.2} = \frac{1}{2} \bar{Q}_{36} = \frac{1}{2} H \cdot \sin \omega t, \quad (1)$$

де  $H$  — амплітуда збурювальної сили,  $H$ ;  $\omega$  — частота збурювальної сили,  $c^{-1}$ .

Крім того, у точках контакту  $K_1$  і  $K_2$  діють рушійні сили  $\bar{P}_1$  і  $\bar{P}_2$ , напрямлені вздовж напрямку руху копача (паралельно осі  $Ox$ ), причому  $P_1 = P_2$ . Внаслідок дії даних сил у зазначених точках контакту виникають нормальні реакції  $N_1$  і  $N_2$  збоку поверхонь клинів  $A_1B_1C_1$  та  $A_2B_2C_2$  відповідно і  $\bar{T}_1$ ,  $\bar{T}_2$  — дотичні складові збурювальних сил  $\bar{Q}_{36.1}$  та  $\bar{Q}_{36.2}$  відповідно. Крім того, в зазначених точках контакту діють сили тертя  $\bar{F}_1$ ,  $\bar{F}_2$ , які виникають при русі коренеплоду по робочих поверхнях клинів. Оскільки вібраційний викопувальний робочий орган має вісь симетрії, то допускаємо, що коренеплід при його вилученні з ґрунту розташований саме на цій осі симетрії. Також вважаємо, що модулі парних сил, які виникають на відповідних площинах клинів, рівні між собою. У центрі ваги коренеплоду буряку діє сила  $\bar{G}$  — вага коренеплоду, його сила зв'язків (зчеплення) з ґрунтом позначена через  $\bar{R}_z$ .

Складемо диференціальне рівняння руху коренеплоду буряку у процесі його вилучення з ґрунту. У векторній формі воно матиме такий вигляд:

$$m\bar{a} = \bar{N}_1 + \bar{N}_2 + \bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \bar{P}_1 + \bar{P}_2 + \bar{R}_z + \bar{R}_x + \bar{G}_k, \quad (2)$$

де  $m$  — маса коренеплоду;  $\bar{a}$  — прискорення вилучення коренеплоду з ґрунту.

Слід одразу зазначити, що оскільки складові нормальних реакцій  $N_i$  ( $i=1, 2$ ) робочих поверхонь  $A_1B_1C_1$  та  $A_2B_2C_2$  на вісь  $Oy$  рівні за величиною і протилежно спрямовані, то вилучення коренеплоду з ґрунту відбувається фактично тільки в площині  $xOz$ , а тому векторне рівняння (2) зводиться до системи двох рівнянь у проєкціях на осі декартової системи координат:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= N_{1x} + N_{2x} + F_{1x} + F_{2x} + P_{1x} + P_{2x} - R_{x'} \\ m\ddot{z} &= N_{1z} + N_{2z} - F_{1z} - F_{2z} - R_z - G_k \end{aligned} \right\} (3)$$

Визначивши значення усіх сил, що входять до рівняння (2), та проєкції цих сил, що входять у систему рівнянь (3), отримаємо таку систему диференціальних рівнянь:

$$m\ddot{x} = H \cos \theta \sin \theta \sin \gamma \sin \omega t + f H \cos^2 \theta \sin \gamma \sin \omega t + 2P_1 - R_{x'}, \quad (4)$$

$$m\ddot{z} = H \cos^2 \theta \sin \omega t - f H \cos \theta \sin \theta \sin \omega t - R_z - G_k. \quad (5)$$

Отримана система диференціальних рівнянь описує процес вібраційного вилучення коренеплоду з ґрунту вздовж осей координат, тобто його рух до повного вилучення.

Проінтегруємо цю систему диференціальних рівнянь, визначивши тим самим швидкість і закон руху коренеплоду вздовж осей координат. Для цього запишемо диференціальне рівняння (5) у такому вигляді:

$$\ddot{z} = \frac{H}{m} (\cos^2 \theta - f \cos \theta \sin \theta) \cdot \sin \omega t - \frac{R_z}{m} - \frac{G_k}{m}. \quad (6)$$

Якщо двічі проінтегрувати дане диференціальне рівняння, то отримаємо значення швидкості і переміщення коренеплоду у напрямку осі  $Oz$  як функції від часу.

Перший інтеграл дорівнюватиме:

$$\dot{z} = -\frac{H}{m\omega} (\cos^2 \theta - f \cos \theta \sin \theta) \cdot \cos \omega t - \frac{1}{m} (R_z + G_k)t + C_1, \quad (7)$$

другий інтеграл дорівнюватиме:

$$z = -\frac{H}{m\omega^2} (\cos^2 \theta - f \cos \theta \sin \theta) \times \sin \omega t - \frac{1}{m} (R_z + G_k) \frac{t^2}{2} + C_1 t + C_2, \quad (8)$$

де  $C_1$  та  $C_2$  — довільні сталі.

Для визначення довільних сталих треба задати початкові умови. При  $t = 0$ :  $z = -h_1$ ,  $\dot{z} = 0$ , де  $h_1$  — глибина розташування (закріплення) коренеплоду у ґрунті.

З огляду на початкові умови, отримаємо значення довільних сталих:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{H}{m\omega} (\cos^2 \theta - f \cos \theta \sin \theta), \\ C_2 &= -h_1. \end{aligned} \quad (9)$$

Після підстановки (9) у вирази (7) і (8) отримаємо:

$$\dot{z} = -\frac{H}{m\omega}(\cos^2 \theta - f \cos \theta \sin \theta) \times \\ \times \cos \omega t - \frac{1}{m}(R_z + G_k) t + \quad (10)$$

$$+ \frac{H}{m\omega}(\cos^2 \theta - f \cos \theta \sin \theta), \\ z = -\frac{H}{m\omega^2}(\cos^2 \theta - f \cos \theta \sin \theta) \times \\ \times \sin \omega t - \frac{1}{m}(R_z + G_k) \frac{t^2}{2} + \frac{H}{m\omega} \times \quad (11) \\ \times (\cos^2 \theta - f \cos \theta \sin \theta) t - h_1.$$

Отже, отримано вирази для визначення швидкості та переміщення коренеплоду в процесі його вилучення з ґрунту вздовж осі Oz при заданих початкових умовах.

Із рівняння (11) можна визначити час  $t_1$  вилучення коренеплоду з ґрунту. Для цього потрібно у ліву частину рівняння (11) підставити значення  $z = 0$  та розв'язати отримане рівняння відносно  $t_1$ .

Оскільки дане рівняння є трансцендентним, то отримати аналітичний вираз для визначення  $t_1$  неможливо, зате його можна вирішити на ПК за допомогою відомих числових методів. Підраховане значення  $t_1$  можна застосувати для визначення продуктивності агрегату при викопуванні коренеплодів вібраційними викопувальними робочими органами.

Аналогічно, після дворазового інтегрування диференціального рівняння (4), можна визначити швидкість і переміщення коренеплоду вздовж осі Ox, тобто в напрямку поступального руху вібраційного викопувального робочого органа. Для цього запишемо диференціальне рівняння (4) у такому вигляді:

$$\ddot{x} = \frac{H}{m} \cdot \sin \gamma \cdot (\cos \theta \sin \theta + \\ + f \cos^2 \theta) \cdot \sin \omega t + \frac{2P_1 - R_x}{m}. \quad (12)$$

Проінтегруємо двічі дане рівняння. Після першого інтегрування диференціального рівняння (12) отримуємо:

$$\dot{x} = -\frac{H}{m\omega} \sin \gamma (\cos \theta \sin \theta + f \cos^2 \theta) \times \\ \times \cos \omega t + \frac{(2P_1 - R_x)}{m} \cdot t + L_1, \quad (13)$$

після другого інтегрування диференціального рівняння (12) маємо:

$$x = -\frac{H}{m\omega^2} \sin \gamma (\cos \theta \sin \theta + f \cos^2 \theta) \times \\ \times \sin \omega t + \frac{(2P_1 - R_x)}{m} \cdot \frac{t^2}{2} + L_1 t + L_2, \quad (14)$$

де  $L_1$  та  $L_2$  — довільні сталі.

Для визначення довільних сталих  $L_1$  і  $L_2$  треба задати початкові умови. Так, при  $t = 0$ :

$$\dot{x} = 0, \quad x = x_0,$$

де  $x_0$  — відстань вертикальної осі коренеплоду від початку системи координат (точка O) в момент часу  $t = 0$ .

З огляду на початкові умови, отримуємо такі значення довільних сталих:

$$L_1 = \frac{H}{m\omega} \sin \gamma (\cos \theta \sin \theta + f \cos^2 \theta) \quad (15)$$

та

$$L_2 = x_0. \quad (16)$$

Підставимо отримані значення довільних сталих  $L_1$  і  $L_2$  у вирази (13) та (14), отримуємо:

$$\dot{x} = -\frac{H}{m\omega} \sin \gamma (\cos \theta \sin \theta + \\ + f \cos^2 \theta) \cos \omega t + \frac{(2P_1 - R_x)}{m} t + \\ + \frac{H}{m\omega} \sin \gamma (\cos \theta \sin \theta + f \cos^2 \theta), \quad (17)$$

та

$$x = -\frac{H}{m\omega^2} \sin \gamma (\cos \theta \sin \theta + \\ + f \cos^2 \theta) \sin \omega t + \frac{(2P_1 - R_x)}{2m} t^2 + \\ + \frac{H}{m\omega} \sin \gamma (\cos \theta \sin \theta + \\ + f \cos^2 \theta) t + x_0. \quad (18)$$

Отже, отримані значення проєкцій швидкості і переміщення коренеплоду на вісь Ox як функцій часу  $t$ , що відповідають заданим початковим умовам.

На підставі отриманих виразів (11) і (18) проведено числові розрахунки на ПК у програмному середовищі MathCAD при конкретних параметрах, що входять до виразів (11) і (18).

Для проведення розрахунків задаємо значення необхідних для цього параметрів.

Дані величини вибираємо згідно [9–10].

- Маса коренеплоду  $m_k = 0,9$  кг;
- довжина коренеплоду  $h_k = 0,25$  м;
- кути тригранних клинів вібраційного викопувального органа:  $\gamma = 14^\circ$ ,  $\beta = 52^\circ$ ;
- коефіцієнт тертя сталі по поверхні коренеплоду  $f = 0,45$ ;
- сили опору ґрунту при переміщенні коренеплоду:  $R_x = 100$  Н,  $R_z = 100$  Н;
- амплітуда збурювальної сили  $H = 500$  Н;
- величина бокової рушійної сили  $P_1 = 400$  Н;
- початкове положення центра мас коренеплоду  $x_{10} = 0,2$  м.

Розрахунки проведемо для частоти коливань вібраційного викопувального робочого органа  $\nu = 10$  Гц.

На базі отриманого закону руху центра мас коренеплоду (11) і (18) в системі координат  $xOz$  побудуємо в середовищі MathCAD графіки  $x = x(t)$ ,  $z = z(t)$  (рис. 2) з метою

визначення часу вилучення коренеплоду з ґрунту при вібраційному викопуванні.

Як видно з графіка, час вилучення коренеплоду з ґрунту ( $z = 0$ ) становить 0,032 с.

Також проведено розрахунки переміщення центра мас коренеплоду вздовж осі  $Oz$  до повного вилучення в залежності від зміни амплітуди збурювальної сили та отримані графіки  $z = z(H, t)$  при  $P_1 = \text{const}$ , та  $z = z(P_1, t)$  при  $H = \text{const}$ .

На рис. 3 зображено поверхню та контурний графік функції  $z = z(H, t)$  за зміни амплітуди збурювальної сили в діапазоні  $H = 100\text{--}700$  Н (для значень бокової рушійної сили  $P_1 = 400$  Н і частоти коливань  $\nu = 10$  Гц).

Як видно з наведеного графіка, за зміни амплітуди збурювальної сили у межах  $100\text{--}700$  Н час вилучення коренеплоду з ґрунту змінюється у межах  $0,053\text{--}0,028$  с.

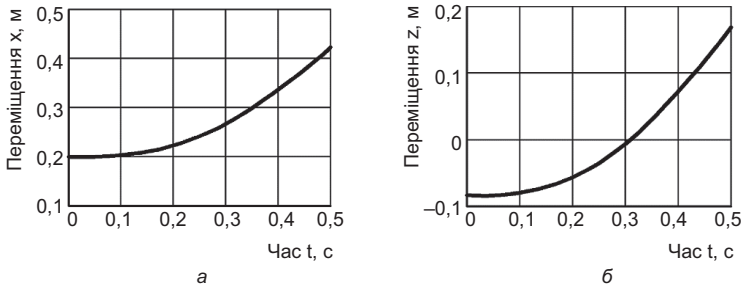


Рис. 2. Графіки залежностей переміщення центра мас коренеплоду вздовж осей  $Ox$  (а) і  $Oz$  (б) від часу при безпосередньому вилученні коренеплоду з ґрунту ( $H = 500$  Н,  $P_1 = 400$  Н,  $R_x = 100$  Н,  $R_z = 100$  Н,  $\nu = 10$  Гц)

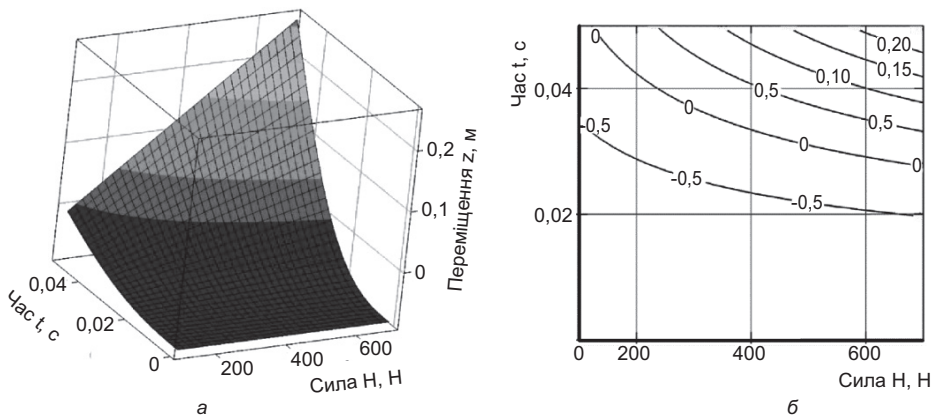


Рис. 3. Поверхня (а) і контурний графік (б) функції  $z = z(H, t)$  за зміни амплітуди збурювальної сили в діапазоні  $H = 100\text{--}700$  Н ( $P_1 = 400$  Н,  $\nu = 10$  Гц)

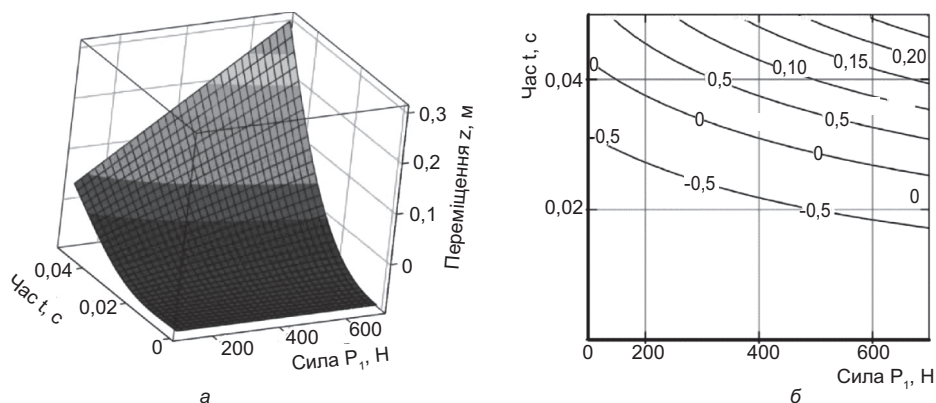


Рис. 4. Поверхня (а) та контурний графік (б) функції  $z = z(P_1, t)$  за зміни бокової рушійної сили в діапазоні  $P_1 = 100 - 700$  Н ( $H = 500$  Н,  $\nu = 10$  Гц)

На рис. 4 зображено поверхню та контурний графік функції  $z = z(P_1, t)$  за зміни бокової рушійної сили в діапазоні  $P_1 = 100 - 700$  Н (для значень амплітуди збурювальної сили  $H = 500$  Н і частоти коливань  $\nu = 10$  Гц).

Як видно з наведеного графіка, за зміни бокової рушійної сили у межах  $100 - 700$  Н

час вилучення коренеплоду з ґрунту змінюється у межах  $0,043 - 0,026$  с.

З урахуванням отриманих результатів дослідження нами розроблено нові конструкції вібраційних викопувальних робочих органів [11–13], використання яких покращує якість виконання даного технологічного процесу.

## Висновки

Побудовано нову розрахункову математичну модель вібраційного вилучення коренеплоду буряка з ґрунту.

Отримано залежності швидкості та переміщення коренеплоду в часі у напрямку поступального руху вібраційного викопувального робочого органа з урахуванням його конструктивних і кінематичних параметрів.

Визначено залежності швидкості та переміщення коренеплоду в часі при його русі вгору в процесі вилучення з ґрунту з урахуванням конструктивних і кінематичних параметрів вібраційного викопувального робочого органа.

При проведенні розрахунків було встановлено, що час вилучення коренеплоду з ґрунту становить  $0,032$  с.

Bulgakov V.<sup>1</sup>, Adamchuk V.<sup>2</sup>, Holovach I.<sup>3</sup>, Ruzhlyo Z.<sup>4</sup>, Ihnatiev Ye.<sup>5</sup>

<sup>1,3,4</sup>National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine; <sup>2</sup>NSC «Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture», 11 Vokzalna Str., Hlevakha township, Vasylkiv region, Kyiv oblast, 08631, Ukraine; <sup>5</sup>Tavria State Agrotechnological University named after Dmytro Motornyi, 18 B. Khmelnytskyi Ave., Melitopol, Zaporizhzhia oblast, 72312, Ukraine, e-mail: <sup>1</sup>vbulgakov@meta.ua, <sup>2</sup>vvadamchuk@gmail.com, <sup>3</sup>holovach.iv@gmail.com, <sup>4</sup>ruzhlyo@nubip.edu.ua, <sup>5</sup>yevhen.ihnatiev@tsatu.edu.ua; ORCID:

<sup>1</sup>0000-0003-3445-3721, <sup>2</sup>0000-0003-0358-7946, <sup>3</sup>0000-0003-1387-4789, <sup>5</sup>0000-0003-0315-1595

### The differential equation of root movement during its vibration excavation from soil

**Goal.** To improve the productivity and quality of digging sugar beetroots by substantiating the rational design and kinematic parameters of the vibrating digging working body. **Methods.** Theoretical research uses methods of higher mathematics, in particular the integration of differential equations, and theoretical mechanics — the basic law of dynamics of a material point. **Results.** An equivalent scheme of force interaction of a root with working surfaces of vibrating digging working body

is made, on the basis of which a new calculated mathematical model of vibration extraction of beet-root from the soil is constructed. The solution of this system of differential equations on the PC made it possible to build the basic graphical relationships between the structural and kinematic parameters of this process. **Conclusions.** New analytical dependences of velocity and root movement in time in the direction of translational motion of the vibrating digging working body taking into account its constructive and kinematic parameters are obtained. With the help of PC, the dependences of

speed and movement of a root in time at its movement upwards in the course of extraction from soil taking into account constructive and kinematic parameters of the vibrating digging working body are constructed. During the calculations, it was found out that the time of extraction of a root from the soil was 0.032 s.

**Key words:** sugar beets, plowshare, vibration excavation, working body, force, differential equations, design parameters.

**DOI:** <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202101-06>

## Бібліографія

1. Василенко П.М., Погорілий Л.В., Брей В.В. Вібраційний спосіб збирання коренеплодів. *Механізація та електрифікація соціалістичного сільського господарства*. 1970, №2. С. 9–13.
2. Булгаков В.М., Головач І.В. Уточнена теорія викопуючого робочого органа лемішного типу. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. Спец. вип. 4 (18). Т. І. Миколаїв: МДАУ, 2002. С. 37–63.
3. Булгаков В.М., Головач І.В. Математичне моделювання поздовжніх коливань коренеплоду при вібраційному вилученні з ґрунту. *Вібрації в техніці і технологіях*. 2003. № 1 (27). С. 11–14.
4. Bosen E.S., Verniaev O.V., Smirnov I.I. & Sultan-Shach E.G. Theory, Construction and Calculation of Agricultural Machines. 2nd Ed., Scientific Publisher, 2019, 81 p.
5. Gu F., Hu Z., Wu H. et al. Development and experiment of 4LT-A staggered-dig sugar beet combine. Nongye Gongcheng Xuebao. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2014. 30(23). P. 1–9.
6. Schmitz T.L., & Smith K.S. Mechanical vibrations: Modeling and measurement. 2012. Springer, 378 p. doi: 10.1007/978-1-4614-0460-6
7. Schulze Lammers P. Harvest and loading machines for sugar beet — new trends. 2011. *International Sugar Journal* 113 (1348). P. 253–256.
8. Schulze Lammers P.S. & Schmittmann O. Testing of sugar beet harvesters in Germany 2012. 2013. *International Sugar Journal* 115(1370). P. 100–106.
9. Л.В. Погорельий, Н.В. Татьяна, В.В. Брей и др. Свеклоуборочные машины (конструирование и расчет); под общ. ред. Л.В. Погорелого. Киев: Техника, 1983. 168 с.
10. Булгаков В.М., Головач І.В. Теорія вібраційного викопування коренеплодів. *Зб. наук. пр. Національного аграрного університету «Механізація сільськогосподарського виробництва»*. 2003. Т. XIV. С. 34–86.
11. Пат. № 9709 України. Віброкопач для коренеплодів, опубл. в бюл. № 3, 1996. Булгаков В.М., Зиков П.Ю., Цурпал І.А., Фінько С.В., Савченко А.М.
12. Пат. № 10723 України. Віброкопач для коренеплодів, опубл. в бюл. №4, 1996. Булгаков В.М., Зиков П.Ю., Цурпал І.А., Фінько С.В., Савченко А.М.
13. Пат. № 10724 України. Віброкопач для коренеплодів, опубл. в бюл. №4, 1996. Булгаков В.М., Зиков П.Ю., Цурпал І.А., Фінько С.В., Савченко А.М.