

## II МАШИНОВИКОРИСТАННЯ У РОСЛИННИЦТВІ ТА ТВАРИННИЦТВІ

*УДК 631.356.02*

### ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ ВІБРАЦІЙНОГО ВИКОПУВАННЯ КОРЕНЕПЛОДІВ

*Калетнік Г.М*

*Вінницький національний аграрний університет*

*Головач І.В*

*Черниш О.М*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*Аналітично розглянутий процес вібраційного викопування коренеплодів цукрових буряків. При цьому коренеплід цукрового буряка моделюється як тверде тіло закріплене у ґрунті, а вібраційний викопуючий робочий орган здійснює коливання у позадвожньо-вертикальній площині.*

*The settlement 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 vibrating digging out body makes fluctuations in is longitudinal a vertical plane.*

#### **Вступ**

Широке застосування вібраційних викопуючих робочих органів у бурякозбиральних машинах сучасного технічного рівня обумовлене значно меншим їх тяговим опором, здатністю вилучати коренеплоди з ґрунту фактично без пошкоджень і втрат. Вібраційні коливання викопуючих лемешів створюють умови, при яких з коренеплодів при їх викопуванні інтенсивно струшується налиплий ґрунт, що сприяє також високому ступеню якісних показників збирання.

Тому розробка нових конструкцій вібраційних викопуючих робочих органів, а також дослідження їх роботи з метою визначення оптимальних конструктивних і кінематичних параметрів є актуальною задачею галузі буряківництва.

#### **Постановка проблеми**

Аналітичне дослідження процесу взаємодії робочих елементів вібраційного копача з коренеплодом, яке проведене з врахуванням кінематичних, конструктивних і технологічних параметрів дасть можливість визначити оптимальні їх значення.

#### **Аналіз результатів останніх досліджень**

Фундаментальні теоретичні і експериментальні дослідження вібраційного викопування коренеплодів цукрових буряків були опубліковані у праці [1], в якій коренеплід моделюється як тіло, що має пружні властивості і його уявлено стержнем змінного поперечного перерізу з одним закріпленням кінцем. Розглянуті в даній роботі поперечні коливання коренеплоду описуються за допомогою диференціального рівняння в частинних похідних четвертого

порядку. Безпосередньо технологічний процес вилучення коренеплоду з ґрунту при вібраційному прикладенні зусиль тут фактично не розглядається, а вказується, що за допомогою додатково складених рівнянь кінетостатики знайдені умови його вилучення з ґрунту під дією збуруючої сили, що прикладена у поперечно-вертикальній площині. Тут вважається, що саме такий напрямок коливань буде найбільш сприятливим для високоякісного викопування коренеплодів цукрових буряків.

У роботі [2] розроблена теорія викопуючого робочого органу звичайного лемішного типу, де знайдені умови вилучення коренеплоду з ґрунту при поступальному русі копача з врахуванням умов непошкодження коренеплодів. У зазначеній роботі отримано вираз для визначення допустимої швидкості поступального руху викопуючого робочого органу при заданих його конструктивних параметрах. У даному випадку процес вилучення коренеплоду з ґрунту відбувається під дією сил, які виникають на робочих поверхнях лемешів внаслідок поступального руху копача вздовж рядків коренеплодів.

Розроблена теорія власних і вимушених коливань тіла коренеплоду [3] необхідна для оцінки впливу зазначених коливань на процес руйнування зв'язків коренеплоду з ґрунтом.

Проте даних розробок недостатньо для повного аналізу безпосереднього вилучення коренеплоду з ґрунту.

#### *Мета дослідження*

Побудувати нову розрахункову модель і аналітично розглянути систему коренеплід – робочий орган для вивчення процесу коливань коренеплоду при його вібраційному вилученні з ґрунту.

#### *Результати дослідження*

Розглянемо процес викопування коренеплодів вібраційним копачем, який здійснюється під дією вертикальної гармонійної збуруючої сили, що передається до лемешів від механізму приводу. Принцип роботи звичайного лемішного копача полягає у тому, що при русі по рядку коренеплодів його клини руйнують пласт ґрунту, який разом з коренеплодом проходить крізь звужене русло копача, що утворене внутрішніми поверхнями клинів. Оскільки клини встановлені під відповідними кутами  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $\gamma$ , то взаємодія пласта ґрунту разом з коренеплодом з боковими поверхнями клинів при їх поступальному русі відбувається таким чином, що пласт стискається з боків, деформується, і для коренеплодів створюються, при подальшому їх русі між робочими поверхнями, що звужуються, відповідні зусилля вилучення з ґрунту.

Слід відмітити, що в процесі вилучення коренеплодів з ґрунту звичайним лемішним копачем важливу роль відіграють сили підпору ґрунту, завдяки яким пласт стискається у звуженому руслі копача, а отже, виникають необхідні для коренеплоду сили вилучення. Таким чином, наявність сил підпору ґрунту є необхідною умовою роботи звичайного лемішного викопуючого робочого органу.

При викопуванні коренеплодів вібраційним копачем, внаслідок коливального руху лемешів, ґрунт у зоні робочого русла копача розпушується, а тому зазначені вище сили вилучення коренеплоду не виникають, оскільки не відбувається необхідної деформації стискання ґрунту в руслі копача. Як зазначено в [4], наявність ґрунту у робочому руслі вібраційного копача не є основною умовою для створення зусилля вилучення коренеплоду з

грунту. В цьому полягає істотна відмінність вібраційного копача перед відомими типами викопуючих робочих органів. У роботі [4] також зазначається, що якщо у руслі звичайного дискового або лемішного викопуючого робочого органу коренеплід при наявності сил підпору ґрунту нахилиється у напрямку руху, то в руслі вібраційного копача вісь коренеплоду при його вилученні з ґрунту весь час зберігає положення, майже перпендикулярне до осі рядка.

Це обумовлене тим, що сили підпору, які є необхідною умовою роботи звичайного лемішного копача, при роботі вібраційного копача вже не мають такої важливості, а отже, обламування коренеплодів внаслідок нахилу осі коренеплоду в напрямку поступального руху вібраційного копача значно зменшується. При вібраційному викопуванні в процесі вертикального переміщення коренеплоди за рахунок надання їм значних прискорень інтенсивно очищуються від налиплого ґрунту.

Таким чином, вилучення коренеплоду з ґрунту при вібраційному викопуванні відбувається за рахунок безпосереднього захвату коренеплоду вібраційним викопуючим робочим органом під дією збуруючої сили, що надається робочому органу від механізму приводу.

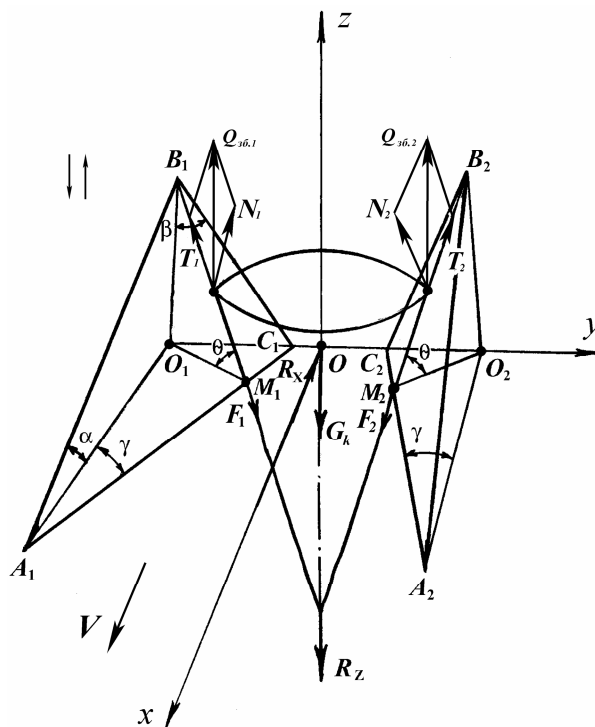
З вище сказаного випливає, що для дослідження процесу вилучення коренеплоду з ґрунту за допомогою вібраційного викопуючого робочого органу необхідно розглянути безпосередній контакт коренеплоду з робочими поверхнями лемешів під час захвату коренеплоду. Цей контакт може відбуватися безпосередньо між робочими поверхнями копача і тілом коренеплоду, або такий контакт відбудеться через достатньо тонкий шар ґрунту.

Складемо еквівалентну схему взаємодії коренеплоду з робочими поверхнями вібраційного викопуючого робочого органу. Для чого представимо вібраційний викопуючий 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.). Вказані клини здійснюють коливальні рухи в повздовжньо-вертикальній площині (механізм приводу лемешів у коливальний рух не показано), напрямком поступального руху вібраційного викопуючого робочого органу показано стрілкою. Зв'яжемо з вібраційним викопуючим робочим органом прямокутну декартову систему координат  $Oxyz$ , центр  $O$  якої знаходиться посередині звуженого русла копача, вісь  $Ox$  співпадає з напрямком поступального руху копача, вісь  $Oz$  має напрямок вгору, а вісь  $Oy$  спрямована у правий бік копача. Проекції точок  $B_1$  і  $B_2$  на вісь  $Oy$  позначимо точками  $O_1$  і  $O_2$  відповідно.

Вважаємо, що з поверхнями клинів  $A_1B_1C_1$  і  $A_2B_2C_2$  у відповідних двох точках взаємодіє коренеплід, який апроксимується тілом конусоподібної форми, що знаходиться всередині копача, власна вісь якого паралельна осі  $Oz$ . Прямі, проведені крізь точки контакту коренеплоду з площинами клинів  $A_1B_1C_1$  і  $A_2B_2C_2$  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,  $\theta$  – 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  $A_2O_2C_2$  та робочою поверхнею клина

$A_2B_2C_2$ .

Покажемо сили, які виникають внаслідок вказаної взаємодії коренеплоду з вібраційним викопуючим робочим органом. В точках контакту коренеплоду з відповідними поверхнями клинів  $A_1B_1C_1$  і  $A_2B_2C_2$  діють збуруючі сили  $\bar{Q}_{зб.1}$  і  $\bar{Q}_{зб.2}$ . Внаслідок дії даних сил у вказаних точках контакту виникають нормальні реакції  $\bar{N}_1$  і  $\bar{N}_2$  з боку поверхонь клинів  $A_1B_1C_1$  і  $A_2B_2C_2$  відповідно і  $\bar{T}_1$ ,  $\bar{T}_2$  – дотичні складові збуруючих сил  $\bar{Q}_{зб.1}$  і  $\bar{Q}_{зб.2}$ . Крім того у вказаних точках контакту діють сили тертя  $\bar{F}_1$  і  $\bar{F}_2$ , які виникають при русі коренеплоду по робочих поверхнях клинів  $A_1B_1C_1$  і  $A_2B_2C_2$  відповідно. Оскільки вібраційний викопуючий робочий орган має вісь симетрії, то, допускаючи що коренеплід при його вилученні з ґрунту розташований саме на цій осі симетрії, вважаємо, що модулі парних сил, які виникають на відповідних площинах клинів  $A_1B_1C_1$  і  $A_2B_2C_2$  рівні між собою. У центрі ваги коренеплоду діє сила  $\bar{G}_k$  – вага коренеплоду, його сила зв'язків (зчеплення) з ґрунтом позначена загальною реакцією  $\bar{R}$ , яка розташована на осі коренеплоду.



**Рис. Силова взаємодія коренеплоду з лемешами вібраційного викопуючого робочого органу**

Складемо диференціальне рівняння руху коренеплоду у процесі його вилучення з ґрунту. У векторній формі воно буде мати такий вигляд

$$m\bar{a} = \bar{N}_1 + \bar{N}_2 + \bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \bar{R} + \bar{G}_k, \quad (1)$$

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

Визначимо значення сил, що входять у вираз (1). Складові  $\bar{T}_1$  і  $\bar{T}_2$  збуруючих сил

$\bar{Q}_{зб.1}$ ,  $\bar{Q}_{зб.2}$  безпосередньо на коренеплід не діють, вони викликають лише розпушування ґрунту навколо коренеплоду, а отже в диференціальні рівняння руху коренеплоду не входять.

Зі схеми рис. 1 отримуємо вирази для визначення нормальних  $N_i$  та дотичних  $T_i$  складових збуруючих сил  $\bar{Q}_{зб.1}$  і  $\bar{Q}_{зб.2}$ :

$$N_1 = N_2 = Q_{зб.1} \cdot \cos \theta, \quad (2)$$

$$T_1 = T_2 = Q_{зб.1} \cdot \sin \theta. \quad (3)$$

Величини сил тертя  $F_1$  і  $F_2$  визначаються з таких виразів:

$$F_1 = F_2 = f N_1 = f Q_{зб.1} \cdot \cos \theta. \quad (4)$$

Очевидно, що, враховуючи вище згадані умови роботи вібраційних викопуючих робочих органів [4], при аналітичному дослідженні процесу вилучення коренеплоду з ґрунту необхідно розглянути дві послідовні фази:

перша – коренеплід міцно зв'язаний з ґрунтом (закріплений у ґрунті) і тому не може переміщуватись вздовж осі  $Oz$ ;

друга – зв'язки коренеплоду з ґрунтом вже ослаблені (майже зруйновані) і починається його рух вгору, тобто вздовж осі  $Oz$ .

Розглянемо спочатку першу фазу.

Для проведення докладного аналізу процесу вилучення коренеплоду з ґрунту запишемо диференціальне рівняння (1) у проекціях на осі декартової системи координат  $Oxyz$ .

Слід відразу зазначити, що оскільки складові нормальних реакцій  $N_i$  робочих поверхонь  $A_1B_1C_1$  і  $A_2B_2C_2$  на вісь  $Oy$  рівні за величиною і протилежно напрямлені, то вилучення коренеплоду з ґрунту відбувається фактично тільки у площині  $xOz$ , а тому векторне рівняння (1) зводиться до системи двох рівнянь такого вигляду:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= N_{1x} + N_{2x} + F_{1x} + F_{2x} - R_x, \\ m\ddot{z} &= N_{1z} + N_{2z} - F_{1z} - F_{2z} - R_z - G_k, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де  $R_x$ ,  $R_z$  – проекції сили зв'язків коренеплоду з ґрунтом на відповідні осі координат.

Визначимо проекції сил, що входять у систему рівнянь (5). Як бачимо з рис. 1, проекції нормальних складових  $N_1$  і  $N_2$  на вісь  $Ox$  дорівнюють:

$$N_{1x} = N_{2x} = N_1 \sin \theta \cdot \sin \gamma = Q_{зб.1} \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot \sin \gamma. \quad (6)$$

Очевидно, що поки коренеплід знаходиться закріпленим у ґрунті, і, під час контакту коренеплоду з клинами, лемеші  $A_1B_1C_1$  і  $A_2B_2C_2$ , в процесі коливань, рухаються вгору (в додатному напрямку осі  $Oz$ ) і при цьому ще не почався рух коренеплоду, то клини можуть просковзнути вздовж тіла коренеплоду, а тому напрям сил тертя можна вважати протилежним напрямку сили  $\bar{T}_i$ , ( $i = 1, 2$ ) (паралельно лініям  $B_1M_1$  та  $B_2M_2$  для робочих поверхонь клинів  $A_1B_1C_1$  та  $A_2B_2C_2$  відповідно). При цьому просковзування вздовж осі  $Ox$ , внаслідок відсутності сил підпору ґрунту, майже не відбуватиметься, а тому коренеплід,

в зв'язку з поступальним рухом копача (оскільки його робочі поверхні встановлені під відповідними кутами до напрямку руху, що створює умови зсуву пласта ґрунту) нахилиться у бік поступального руху на деякий невеликий кут.

Таким чином, з вище сказаного та з силової схеми рис. 1 можна написати, що проекції сил тертя  $\bar{F}_1$  та  $\bar{F}_2$  на вісь  $Ox$  будуть дорівнювати:

$$F_{1x} = F_{2x} = F_1 \cdot \cos \theta \cdot \sin \gamma,$$

або, враховуючи (4), матимемо

$$F_{1x} = F_{2x} = f \cdot Q_{3\phi.1} \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin \gamma. \quad (7)$$

Проекції нормальних складових  $\bar{N}_1$  і  $\bar{N}_2$  на вісь  $Oz$  згідно схеми рис. 1 будуть дорівнювати:

$$N_{1z} = N_{2z} = N_1 \cdot \cos \theta,$$

або, враховуючи вираз (2), отримаємо

$$N_{1z} = N_{2z} = Q_{3\phi.1} \cdot \cos^2 \theta. \quad (8)$$

Проекції сил тертя  $\bar{F}_1$  і  $\bar{F}_2$  на вісь  $Oz$  також згідно схеми рис. 1 будуть дорівнювати

$$F_{1z} = F_{2z} = F_1 \cdot \sin \theta$$

або, враховуючи вираз (4), отримаємо

$$F_{1z} = F_{2z} = f \cdot Q_{3\phi.1} \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta. \quad (9)$$

Підставляючи вирази (6), (7) у перше рівняння системи (5), отримаємо:

$$m \ddot{x} = 2Q_{3\phi.1} \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot \sin \gamma + 2f \cdot Q_{3\phi.1} \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin \gamma - R_x. \quad (10)$$

Оскільки

$$Q_{3\phi.1} = \frac{1}{2} Q_{3\phi} = \frac{1}{2} H \cdot \sin \omega t, \quad (11)$$

де  $H$  – амплітуда вимушених коливань;  $\omega$  – частота вимушених коливань, то рівняння (10) набуде такого вигляду:

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

Проаналізуємо процес вібраційного вилучення коренеплоду з ґрунту окремо розглядаючи рівняння, що входять у систему (5). Так, отримане рівняння (12) описує вимушені коливання коренеплоду у ґрунті вздовж осі  $Ox$  з нижнім жорстко закріпленим кінцем.

Очевидно, що дане рівняння має місце за умови безпосереднього контакту коренеплоду з поверхнями клинів  $A_1B_1C_1$  і  $A_2B_2C_2$ , тобто коли вони рухаються вгору. Це буде можливо за такої умови:

$$0 \leq \sin \omega t \leq 1.$$

Якщо ж має місце протилежна нерівність такого вигляду

$$-1 \leq \sin \omega t \leq 0,$$

то це означає, що поверхні клинів  $A_1B_1C_1$  і  $A_2B_2C_2$  рухаються вниз.

Оскільки вважаємо, що коренеплід має конусоподібну форму, то, за умови виконання останньої нерівності, втрачається безпосередній контакт коренеплоду з поверхнями клинів

копача, а отже за час відсутності контакту коренеплід, за рахунок власної пружності, встигає повернутись у вертикальне положення. Можна наближено вважати, що за час відсутності контакту з поверхнями лемешів коренеплід здійснює затухаючі коливання вздовж осі  $Ox$  при наявності опору та відсутності збурюючої сили. За появи нового контакту, внаслідок зміни напрямку коливального руху поверхонь лемешів та поступального руху викопуючого робочого органу (русло в задній частині копача є звуженим) все повторюється спочатку. З вище сказаного випливає, що при вібраційному вилученні з ґрунту коренеплід зберігає майже вертикальне положення, що узгоджується з основними положеннями, викладеними в [4].

Розглянемо далі друге рівняння системи (5). Підставимо в дане рівняння вирази (8), (9), отримаємо:

$$m \ddot{x} = 2Q_{зб.1} \cdot \cos^2 \theta - 2f \cdot Q_{зб.1} \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta - R_z - G_k,$$

або, враховуючи (11), матимемо:

$$m \ddot{x} = H \cos^2 \theta \cdot \sin \omega t - f H \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot \sin \omega t - R_z - G_k. \quad (13)$$

Очевидно, що в першій фазі (коренеплід міцно зв'язаний з ґрунтом) ліва частина диференціального рівняння (13) дорівнює нулю, а тому це рівняння перетворюється у рівняння статички, тобто рівняння рівноваги коренеплоду у ґрунті вздовж осі  $Oz$  такого вигляду:

$$\left( H \cos^2 \theta - f H \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \right) \sin \omega t - R_z - G_k = 0. \quad (14)$$

За подальшої умови безпосереднього контакту коренеплоду з поверхнями  $A_1B_1C_1$  і  $A_2B_2C_2$  лемешів (тобто за умови  $0 \leq \sin \omega t \leq 1$ ) відбуваються вимушені повздовжні коливання коренеплоду, які розглянуті у роботі [5]. При відсутності контакту коренеплоду з вказаними поверхнями лемешів коренеплід здійснює затухаючі коливання вздовж осі  $Oz$  при наявності опору. Таким чином, коренеплід за умови (14) весь час здійснює повздовжні коливання, або вимушені або затухаючі при наявності опору. Крім того, виникають ударні навантаження при вході коренеплоду в черговий контакт з лемешами. Все це призводить до інтенсивного руйнування зв'язків коренеплоду з ґрунтом, а отже порушення умови рівноваги (14) внаслідок зменшення величини сили  $\bar{R}_z$ .

Таким чином, настає момент часу, при якому замість рівності (14) виконується нерівність такого вигляду:

$$\left( H \cos^2 \theta - f H \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \right) \sin \omega t - G_k > R_z. \quad (15)$$

За умови (15) починається рух коренеплоду вгору, який описується диференціальним рівнянням (13).

Отже, перейдемо далі до розгляду другої фази, коли коренеплід починає рух у ґрунті згідно диференціального рівняння (13).

Запишемо диференціальне рівняння (13) у такому вигляді:

$$\ddot{x} = \frac{H}{m} \left( \cos^2 \theta - f \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \right) \sin \omega t - \frac{R_z}{m} - \frac{G_k}{m}. \quad (16)$$

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

Перший інтеграл буде дорівнювати

$$\dot{z} = -\frac{H}{m \cdot \omega} (\cos^2 \theta - f \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta) \cos \omega t - \frac{1}{m} (R_z + G_k) t + C_1, \quad (17)$$

другий інтеграл буде дорівнювати

$$z = -\frac{H}{m \cdot \omega^2} (\cos^2 \theta - f \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta) \sin \omega t - \frac{1}{m} (R_z + G_k) \frac{t^2}{2} + C_1 t + C_2, \quad (18)$$

де  $C_1$  і  $C_2$  – довільні сталі.

Для знаходження довільних сталих необхідно задати початкові умови. При  $t = 0$ :

$$\begin{aligned} z &= -h_1, \\ \dot{z} &= 0, \end{aligned}$$

де  $h_1$  – глибина знаходження (закріплення) коренеплоду у ґрунті.

Враховуючи початкові умови, отримуємо значення довільних сталих:

$$C_1 = \frac{H}{m \cdot \omega} (\cos^2 \theta - f \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta), \quad (19)$$

$$C_2 = -h_1.$$

Після підстановки (19) у вирази (17) і (18) отримуємо:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= -\frac{H}{m \cdot \omega} (\cos^2 \theta - f \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta) \cos \omega t - \frac{1}{m} (R_z + G_k) t + \\ &+ \frac{H}{m \cdot \omega} (\cos^2 \theta - f \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta), \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} z &= -\frac{H}{m \cdot \omega^2} (\cos^2 \theta - f \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta) \sin \omega t - \frac{1}{m} (R_z + G_k) \frac{t^2}{2} + \\ &+ \frac{H}{m \cdot \omega} (\cos^2 \theta - f \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta) t - h_1. \end{aligned} \quad (21)$$

Таким чином, отримані вирази для визначення швидкості і переміщення коренеплоду у процесі його вилучення з ґрунту вздовж осі  $Oz$  при заданих початкових умовах.

З рівняння (21) можна визначити час  $t_1$  вилучення коренеплоду з ґрунту. Для цього необхідно у ліву частину рівняння (21) підставити значення  $z = 0$  і розв'язати отримане рівняння відносно  $t_1$ .

Оскільки зазначене рівняння є трансцендентним, то отримати аналітичний вираз для визначення  $t_1$  неможливо, проте його можна розв'язати на ПЕОМ за допомогою відомих чисельних методів. Обчислене значення  $t_1$  можна застосовувати для визначення продуктивності агрегату для викопування коренеплодів вібраційними викопуючими робочими органами.

Вище було зазначено, що протягом часу, при якому коренеплід був закріплений у ґрунті, рівняння (12) описує вимушені коливання вздовж осі  $Ox$  коренеплоду у ґрунті. Проте, коли коренеплід втрачає зв'язки з ґрунтом і починає рухатись у ґрунті, рівняння (12) описує рух коренеплоду вздовж осі  $Ox$  до повного його вилучення.



Отже, аналогічно, після двократного інтегрування диференціального рівняння (12), можна визначити швидкість і переміщення коренеплоду вздовж осі  $Ox$ , тобто у напрямку поступального руху вібраційного викопуючого робочого органу. Для цього запишемо диференціальне рівняння (12) у такому вигляді:

$$\ddot{x} = \frac{H}{m} \sin \gamma \left( \cos \theta \cdot \sin \theta + f \cdot \cos^2 \theta \right) \sin \omega t - R_x. \quad (22)$$

Проінтегруємо двічі дане рівняння. Після першого інтегрування диференціального рівняння (22) отримуємо:

$$\dot{x} = -\frac{H}{m \cdot \omega} \sin \gamma \left( \cos \theta \cdot \sin \theta + f \cdot \cos^2 \theta \right) \cos \omega t - \frac{R_x}{m} t + L_1, \quad (23)$$

після другого інтегрування диференціального рівняння (22) матимемо:

$$x = -\frac{H}{m \cdot \omega^2} \sin \gamma \left( \cos \theta \cdot \sin \theta + f \cdot \cos^2 \theta \right) \sin \omega t - \frac{R_x}{2m} t^2 + L_1 t + L_2, \quad (24)$$

де  $L_1$  і  $L_2$  – 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  $t = 0$ .

Враховуючи початкові умови, отримуємо наступні значення довільних сталих:

$$L_1 = \frac{H}{m \cdot \omega} \sin \gamma \left( \cos \theta \cdot \sin \theta + f \cdot \cos^2 \theta \right), \quad (25)$$

і

$$L_2 = x_0. \quad (26)$$

Підставимо отримані значення довільних сталих  $L_1$  і  $L_2$  у вирази (23) і (24), отримаємо:

$$\begin{aligned} \dot{x} = & -\frac{H}{m \cdot \omega} \sin \gamma \left( \cos \theta \cdot \sin \theta + f \cdot \cos^2 \theta \right) \cos \omega t - \frac{R_x}{m} t + \\ & + \frac{H}{m \cdot \omega} \sin \gamma \left( \cos \theta \cdot \sin \theta + f \cdot \cos^2 \theta \right), \end{aligned} \quad (27)$$

і

$$\begin{aligned} x = & -\frac{H}{m \cdot \omega^2} \sin \gamma \left( \cos \theta \cdot \sin \theta + f \cdot \cos^2 \theta \right) \sin \omega t - \\ & - \frac{R_x}{2m} t^2 + \frac{H}{m \cdot \omega} \sin \gamma \left( \cos \theta \cdot \sin \theta + f \cdot \cos^2 \theta \right) t + x_0. \end{aligned} \quad (28)$$

Таким чином, отримані значення проєкцій швидкості і переміщення коренеплоду на вісь  $Ox$  як функції від часу  $t$ , що задовольняють заданим початковим умовам.

З врахуванням отриманих результатів дослідження нами розроблені нові конструкції вібраційних викопуючих робочих органів [6-8], які покращують якість виконання даного технологічного процесу.

### **Висновки**

1. Побудована нова розрахункова математична модель вібраційного вилучення коренеплоду з ґрунту.

2. Визначені швидкість і переміщення коренеплоду у напрямку поступального руху вібраційного викопуючого робочого органу з врахуванням його конструктивно – кінематичних параметрів.

### **Література**

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. Булгаков В.М., Головач І.В. Уточнена теорія викопуючого робочого органу лемішного типу // *Вісник аграрної науки Причорномор'я. Спеціальний випуск 4(18). Том І.* – Миколаїв: МДАУ, 2002. – С. 37 – 63.
3. Булгаков В.М., Головач І.В., Войтюк Д.Г. Математичне моделювання поздовжніх коливань коренеплоду при вібраційному вилученні з ґрунту. – *Вибрації в техніці та технологіях*, 2003, № 1(27). – С. 11 – 14.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.