

**Стоцько З.А.**

д.т.н., професор

**Топільницький В. Г.**

к.т.н., доцент

**Кусий Я.М.**

к.т.н., доцент

**Ребот Д. П.**

к.т.н., асистент

**Національний  
університет «Львівська  
політехніка»****Stotsko Z.****Topilnyskyu V.****Kusyi Y.****Rebot D.****Lviv Polytecnic National  
University****УДК 621.7.02****DOI:10.37128/2306-8744-2019-1-4**

## **ВІБРАЦІЙНА МАШИНА ДЛЯ СУХОГО ОЧИЩЕННЯ ТА ТРАНСПОРТУВАННЯ КОРЕНЕБУЛЬБОПЛОДІВ І ЇЇ НЕЛІНІЙНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ**

Запропоновано конструкцію вібраційної машини для сухого очищення та транспортування коренебульбоплодів різного виду за формою та розміром. Машина має незалежний вібраційний дебалансний привод та пружинну підвіску. Її оснащено системою сіток та розділювачами сировини для підвищення ефективності процесу очищення. Її притаманний широкий діапазон зміни кінематичних, силових та геометричних параметрів, що забезпечує регульованість інтенсивності процесу очищення в залежності від типу сировини.

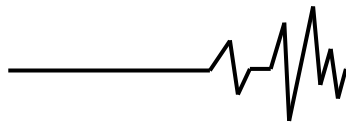
Побудована нелінійна математична модель опису руху даної машини з метою вивчення її динаміки та підбору параметрів, які б забезпечили максимальну ефективність її функціонування. Модель є параметричною і уніфікованою, та являє собою систему аналітичних залежностей опису кولیного руху робочої камери машини та сировини, що підлягає очищенню, в залежності від параметрів машини.

**Ключевые слова:** сухе очищення, коренебульбоплоди, математична модель, вібраційна машина, пружинна підвіска, дебаланс, робоча камера.

**Постановка проблеми.** Поверхні вирощених овочів (коренебульбоплодів під землею та на поверхні ґрунту) містять забруднення найрізноманітнішого типу та виду. Ці забруднення неодмінно слід видалити перед тим як використовувати овочі для перероблення та зберігання. В даній роботі мова йде про таку важливу ланку процесу виробництва продуктів харчування як очищення, зокрема коренебульбоплодів – картоплі, буряка, моркви, редьки тощо. Власне про сухе очищення, а не миття. Існує багато способів очищення (миття) коренебульбоплодів водою [1]. Але тут виникають проблеми з витратами води її підведенням, відведенням та необхідним процесом сушіння помитої сировини [2]. Не висушені цілком коренебульбоплоди не зможуть довго зберігатись в сховищах – почнуть псуватись, пліснявіти та гнити. Всі затрати на миття та сушіння виробникові доведеться включити в собівартість виготовлення, а це, в кінцевому результаті, відобразиться на відпускній ціні

товару (продукту харчування), що неодмінно зменшить його конкурентоздатність. Сухе очищення коренебульбоплодів дасть змогу ефективно очистити їх та уникнути всі перелічені вище проблеми миття.

Важкі об'ємні забруднення з поверхонь коренебульбоплодів доцільно усувати за допомогою так званого «сухого миття» чи «сухого очищення». Суть даного методу полягає в певному механічному впливі на поверхню коренебульбоплодів без залучення води. В результаті цього впливу забруднення видаляються повністю або у великому відсотковому відношенні. Слід наголосити, що коренебульбоплоди мають більш твердішу поверхню ніж звичайні овочі та фрукти, що забезпечує раціональність застосування цього методу саме для них. Механічний вплив має бути такої максимальної сили, щоб не допустити пошкодження поверхні чи «травмування» самого коренеплоду. В цьому полягає проблематика застосування такого методу очищення [3].



**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існує низка обладнання для реалізації процесу «сухого» очищення коренебульбоплодів [2], [3], [4]. Робочими органами такого обладнання можуть бути прогумовані ролики, набори щіток тощо. Також вони можуть бути представлені у вигляді барабанів конічної чи циліндричної форми, та в середині яких з певним кроком розміщені набори металевих прутів із арматури. Коренебульбоплоди завантажуються в середину такого барабану. При його обертотому русі вони перемішуються та труться один об одній, стінки барабану та металеві пруті, очищаючись від забруднень при цьому за допомогою сили тертя [2], [4]. Але дане обладнання має дещо вузьке призначення, так як спеціалізується на очищенні коренебульбоплодів одного виду.

Створення ефективного обладнання для очищення коренебульбоплодів не можливе без їх детального теоретичного дослідження, зокрема моделювання його динаміки. Існують математичні моделі самого процесу очищення коренебульбоплодів та функціонування відповідного обладнання [5]. Але більшість з них є в лінійній постановці задачі та мають обмежене застосування.

#### **Формулювання мети досліджень.**

Розроблення конструкції машини з вібраційним дебалансним приводом та пружинною підвіскою призначеної для сухого очищення на транспортування коренебульбоплодів. Побудова нелінійної математичної моделі даної машини з метою вивчення її динаміки та підбору геометричних, кінематичних та силових параметрів, які б забезпечили максимальну ефективність її функціонування.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Великим недоліком наявного обладнання для очищення фруктів та овочів є те, що його проєктують під певний вид сировини. Воно є мало універсальним. Відповідно актуальною задачею є розроблення нових конструкцій машин, які уможливлювали: очищення сировини різного виду; мали нескладну будову та регульовані нескладно параметри очищення; були надійними, ремонтоздатними, економними; були б відносно дешевими з невеликим терміном окупності. Таке обладнання було б дуже конкурентоздатним, воно могло б застосовуватись у фермерських господарствах різного розміру з різним рівнем отримання врожайності.

В даній роботі запропоновано конструкцію машини, яка має вібраційний привід дебалансного типу. Підвіска машини виконана основі застосування системи витих циліндричних пружин з високою поперечною

жорсткістю. Направлені коливання – вібрації при очищенні коренебульбоплодів дають змогу збільшити та регулювати інтенсивність перемішування їх між собою в робочій камері машини, збільшити інтенсивність тертя одиниць сировини між собою та об внутрішні частини робочої камери, що суттєво покращить якість очищення та скоротить його час. Вібраційний привід машини має високу експлуатаційну надійність, нескладну конструкцію та просте обслуговування. Його регульованість дає змогу змінювати амплітуду коливань робочої камери, а, відповідно, і інтенсивність очищення сировини. Відповідно, для більш м'якої сировини будуть вибрані режими більш «легші», з мінімальною амплітудою. Для твердих коренебульбоплодів амплітуда очищення буде більшою, відповідно режим оброблення буде жорсткішим. За рахунок використання системи незалежних блоків дебалансів реалізовано коливання – «вібрування» робочої камери різної форми. Різна амплітуда коливань протилежних кінців робочої камери машини забезпечує режим вібраційного транспортування коренебульбоплодів. Тобто дану машину можна використовувати як і транспортер. Коренебульбоплоди будуть завантажуватись з однієї сторони машини в робочу камеру і будуть переміщатись нею до другого кінця (місця вивантаження), очищуючись при цьому сухим методом. Очищена сировина зможе при цьому вивантажитись в тару для подальшого транспортування чи перероблення. При цьому цей процес можна зробити неперервним: завантаження – транспортування плюс очищення – розвантаження. Для невеликих об'ємів сировини розроблена конструкція машини дасть змогу спершу очистити сировину сухим способом, а потім навіть помити її водою методом спринцювання (під душем). Перемішування сировини вібраційними коливаннями пришвидшить цей процес. Конструкція машини передбачає ефективну систему збору та відведення відходів. Спершу це буде забруднення від сухого очищення, потім це буде забруднена вода після миття.

На рис 1. зображено принципова схема запропонованої конструкції вібраційної машини для сухого очищення коренебульбоплодів. На ній позначено основні компоненти вібраційної машини:

1. Робоча камера циліндричної чи U – подібної форми;
2. Внутрішня концентрична сітка з дрібними комірками. Сітка очищуватиме поверхні коренебульбоплодів, які будуть тертись об неї, також сітка, маючи циліндричну форму, служить обмежувачем простору. Вона відсікає простір в робочій камері, у якому



(згідно практичного досвіду) рівень коливань та перемішування коренеплодів буде мінімальний. Дрібні комірочки в сітці унеможливають проходження через неї одиниць сировини, яка очищається, забезпечуючи лише тертя та відвід видалених забруднень;

3. Зовнішня концентрична сітка з дрібними комірками. Вона також призначена для кращого очищення поверхонь коренеплодів, а також для відмежування їх від внутрішньої стінки робочої камери вібраційної машини. Так конструктивно передбачено між зовнішньою

сіткою та камерою простір, де акумулюватимуться відділені від сировини забруднення. При перемішуванні коренеплодів забруднення будуть видалятись та провалюватимуться через дві концентричні сітки на дно камери машини;

4. Розділювачі сировини. Вони представляють собою металеві стержні довільного перерізу встановлені в радіальному напрямі. Стержні з'єднують дві концентричні сітки для очищення. Їх призначення – розділення сировини при її очищенні для інтенсифікації процесу сухого очищення;

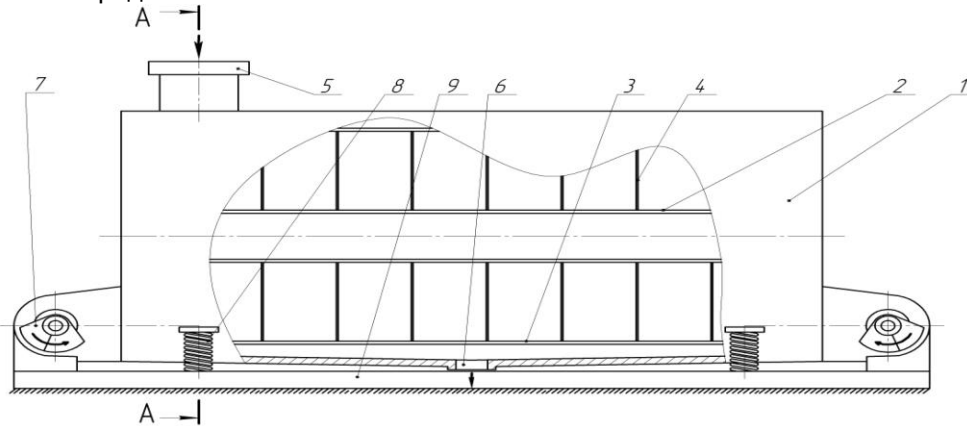


Рис. 1.а. Вібраційна машина для сухого очищення – головний вид.

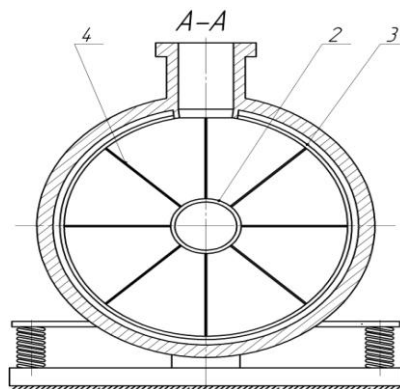


Рис. 1.б. Вібраційна машина для сухого очищення – вид збоку (переріз).

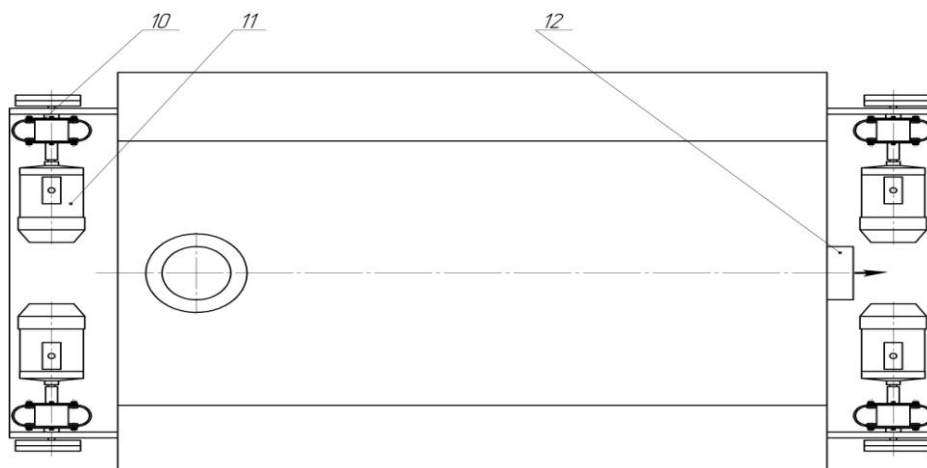
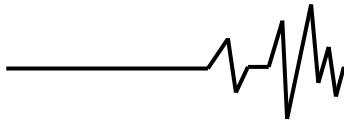


Рис. 1.в. Вібраційна машина для сухого очищення – вид зверху.

**Рис. 1. Принципова схема вібраційної машини для сухого очищення коренебульбоплодів.**

5. Патрубок для завантаження насипом забрудненої сировини;

6. Зона для вивантаження забруднень з робочої камери машини. Робоча камера має похиле дно до патрубка 6. Сухі відділені забруднення від дією вібраційних коливань переміщатимуться дном камери та видаляться через патрубок. Якщо ж дану машину використовувати для наступного миття сировини (про це згадувалось вище), то через похиле дно вода із забрудненнями видалятиметься з камери знову ж таки через патрубок 6;

7. Незалежні керовані дебаланси для реалізації коливань робочої камери машини різної форми, в тому числі і направлених – для транспортування і вивантаження очищеної сировини;

8. Пружна підвіска – система витих циліндричних пружин з високою поперечною жорсткістю;

9. Зварна рама машини виконана із сталевого профільного прокату;

10. Пружні ремінні муфти для передачі обертового моменту від електродвигунів приводу до дебалансних валів. Дані муфти унеможливають передачу коливань від робочої камери на електродвигуни, які встановлені на рамі нерухомо;

11. Приводні електродвигуни (змінного струму, асинхронні). Їх є чотири штуки, хоча конструктивно може бути і два – з торців робочої камери. Маючи незалежний привід двигуни можуть працювати реверсивно, бути ввімкнені та вимкнені довільним чином, створюючи при цьому коливання робочої камери досить широкого виду;

12. Зона – патрубок для вивантаження сировини. Він розміщений в нижній частині на протилежному торці робочої камери від зони завантаження. Рухаючись по концентричних сітках (між ними) 2 та 3 від завантажувального патрубка 5 до вивантажувального 12 – коренебульбоплоди перемішуються та очищаються.

Робочу камеру можна запроектувати довільної довжини, виходячи з міркувань максимального рівня сухого очищення коренебульбоплодів та необхідної відстані їх транспортування. Перед увімкненням машини патрубок вивантаження 12 закривають, далі вмикають привод та починають засипати сировину (коренебульбоплоди – картоплю, буряк, моркву тощо). Неврівноважена обертова маса дебалансів створює коливання робочої

камери на пружній підвісці, які передаються ситам. Сировина в результаті підкидується, перемішується, обертається, третється між собою та ситами та очищується. При нерівномірному наданні частинам робочої камери амплітуд коливань сировина направлено буде рухатись до патрубка вивантаження 12. Реалізація коливань частин камери з різною амплітудою уможливорюється шляхом розведення неврівноважених мас дебалансного приводу або їх зміни.

Запропонована конструкція вібраційної машини є універсальною та може застосовуватись і для подальшого миття коренебульбоплодів, які пройшли суху очистку (для їх невеликих партій). Тоді у верхній частині робочої камери додатково можна змонтувати систему подачі води методом розбризкування (спринцювання).

Для того щоб дослідити коливний рух машини для очищення коренебульбоплодів – характер коливань та амплітуду робочої камери зі сировиною побудовано нелінійну математичну модель опису руху машини.

При використанні дебалансного приводу для генерації вібраційних коливань слід наголосити, що збурююча сила від обертання неврівноваженої маси дебалансів виникає в площинах їх обертання, тобто паралельно поздовжнім вертикальним перерізам циліндра робочої камери. Розглядаючи ці перерізи робочої камери будемо спостерігати їх плоско паралельний рух. Звичайно, із-за використання підвіски на витих циліндричних пружинах, існуватимуть додаткові коливання в площинах поздовжніх горизонтальних перерізів циліндра робочої камери. Але їх амплітуда є незначною порівняно з коливаннями в площині обертання дебалансів. Відповідно цими коливаннями камери можна знехтувати для спрощення побудови моделі.

Кожна точка робочої камери одночасно зможе рухатись по двох координатах в площині обертання дебалансів та обертатись навколо своєї осі. Приймемо два припущення. Перше – не будемо розглядати сировину окремо. Її масу додамо до маси самої робочої камери. Друге – вважатимемо, що з кожного торця робочої камери коливання виникають за рахунок збурюючої сили, яка є рівнодійною від коливань неврівноваженого обертового руху пари дебалансів з відповідного торця.

На рис. 2. зображено розрахункову схему вібраційної машини для сухого очищення коренебульбоплодів:

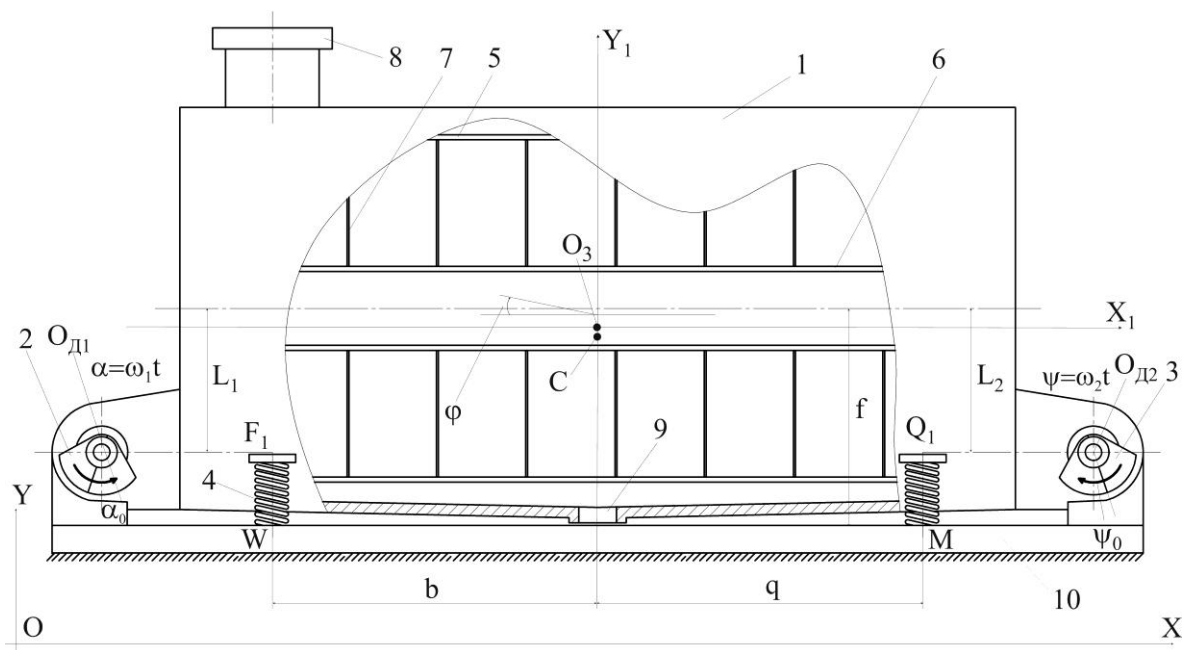


Рис. 2. Розрахункова схема вібраційної машини для сухого очищення коренеплодів.

На рис. 2. та в математичній моделі машини позначено наступні елементи: 1 – робоча камера машини для очистки, яка має загальну масу  $M_K$  (маса камери, нависного обладнання та сировини, що очищується); 2, 3 – приводні дебаланси; 4 – пружини підвіски (циліндричні, виті з підвищеною поперечною жорсткістю); 5, 6 – циліндричні сита зі сітки; 7 – розділювачі сировини; 8 – завантажувальна зона машини;  $XOY$  – координатна система пов'язана з рамою машини;  $X_1O_3Y_1$  – координатна система пов'язана з робочою камерою машини, та рухається разом з нею. Коли машина вимкнена – центри координатних систем співпадають;  $\varphi$  – кут повороту машини під час її функціонування в площині обертання дебалансів;  $s$  – вертикальна координата центру мас робочої камери машини для очищення коренеплодів;  $S = CO_3$  – відстань від початку координат системи  $X_1O_3Y_1$  до центру мас машини;  $O_{D1}$  – центр обертання лівого дебалансу;  $O_{D2}$  – центр обертання правого дебалансу;  $r_1, r_2$  – зміщення неврівноважених мас дебалансів щодо його центрів обертання;  $M_{D1}, M_{D2}$  – маси дебалансів;  $k_1, k_2$  – відстань від центрів обертання дебалансів до вертикальної осі системи координат  $X_1O_3Y_1$ ,  $L_1, L_2$  –

відстань від центрів обертання дебалансів до горизонтальної осі системи координат  $X_1O_3Y_1$ ,  $\omega_1$  і  $\omega_2$  – кутові швидкості обертального руху дебалансів (відповідно лівого та правого);  $\alpha_0$  і  $\psi_0$  – початкові фази положень центрів мас дебалансів;  $\alpha = \omega_1 t$  та  $\psi = \omega_2 t$  – фази центрів мас дебалансів в довільний момент часу очищення;  $C$  – сумарна величина жорсткості підвіски машини для очищення, причому  $C_1$  – жорсткість лівої частини підвіски,  $C_2$  – жорсткість правої частини підвіски;  $WF_1$  і  $MQ_1$  – довжини пружин підвіски машини для очищення при її роботі в будь-який момент часу;  $WF$  та  $MQ$  – довжини пружин підвіски машини для очищення при її статичному положенні.

В моделі всі параметри машини для очищення задані в символічному форматі і їх можна буде змінювати. Ключовою точкою у вібраційній машині для очищення коренеплодів (з точки зору моделі) є точка  $O_3$ . Знаючи її закон руху можна дослідити коливний процес будь-якої точки машини для очищення. Нелінійна математична модель опису динаміки запропонованої вібраційної машини буде представляти собою систему аналітичних виразів визначення узагальнених координат машини, куди входить усі необхідні параметри



вібраційної машини для очищення, що впливатимуть суттєво на характер її коливного руху. Для побудови нелінійної моделі використаємо методику, яка застосована авторами в [6], [7] на основі [8], [9].

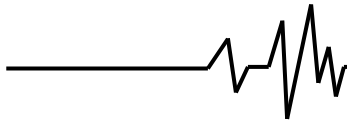
В кінцевому результаті нелінійна математична модель опису руху вібраційної машини для очищення коренебульбоплодів матиме вигляд:

а) вираз для горизонтальної узагальненої координати –

$$\begin{aligned}
 x_{o3} = & x_0 \sin\left(\sqrt{\frac{c}{M}}t + \alpha_x\right) + \frac{\varepsilon}{\sqrt{\frac{c}{M}}} \int_0^t \left( -\ddot{\varphi} \left[ \begin{aligned} & M_K S \cos \varphi + M_{Д1} \left( r_1 \cos(\omega_1 t + \varphi + \alpha_0) + \right. \right. \\ & \left. \left. + l_1 \sin \varphi - k_1 \cos \varphi \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + M_{Д2} (r_2 \cos(\omega_2 t + \varphi + \psi_0) - l_2 \sin \varphi - k_2 \cos \varphi) \right) - \right. \\ & \left. - (\dot{\varphi})^2 \left( \begin{aligned} & -M_K S \sin \varphi + M_{Д1} (-r_1 \sin(\omega_1 t + \varphi + \alpha_0) + l_1 \cos \varphi + k_1 \sin \varphi) + \right. \right. \\ & \left. \left. + M_{Д2} (-r_2 \sin(\omega_2 t + \varphi + \psi_0) - l_2 \cos \varphi + k_2 \sin \varphi) \right) + \right. \\ & \left. + M_{Д1} r_1 \sin(\omega_1 t + \varphi + \alpha_0) (\omega_1^2 + 2\omega_1 \dot{\varphi}) + M_{Д2} r_2 \sin(\omega_2 t + \varphi + \psi_0) (\omega_2^2 + 2\omega_2 \dot{\varphi}) - \right. \\ & \left. - C_1 \left( \sqrt{(x_{o3} - b \cos \varphi + f \sin \varphi + b)^2 + \left( y_{o3} - b \sin \varphi - f \cos \varphi + f + L_{np} - \frac{Mg}{c} \right)^2} - L_{np} \right) \times \right. \\ & \left. \times \left( \frac{x_{o3} - b \cos \varphi + f \sin \varphi + b}{\sqrt{(x_{o3} - b \cos \varphi + f \sin \varphi + b)^2 + \left( y_{o3} - b \sin \varphi - f \cos \varphi + f + L_{np} - \frac{Mg}{c} \right)^2}} - \right. \right. \\ & \left. \left. - C_2 \left( \sqrt{(x_{o3} + q \cos \varphi + f \sin \varphi - q)^2 + \left( y_{o3} + q \sin \varphi - f \cos \varphi + f + L_{np} - \frac{Mg}{c} \right)^2} - L_{np} \right) \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times \left( \frac{x_{o3} + q \cos \varphi + f \sin \varphi - q}{\sqrt{(x_{o3} + q \cos \varphi + f \sin \varphi - q)^2 + \left( y_{o3} + q \sin \varphi - f \cos \varphi + f + L_{np} - \frac{Mg}{c} \right)^2}} \right) \right) \right) \times \\ & \left. \times \sin\left(\sqrt{\frac{c}{M}}(t - u)\right) du, \right.
 \end{aligned}$$

б) вираз для вертикальної узагальненої координати –

$$\begin{aligned}
 y_{o3} = & y_0 \sin\left(\sqrt{\frac{c}{M}}t + \alpha_y\right) + \frac{\varepsilon}{\sqrt{\frac{c}{M}}} \int_0^t \left( -\ddot{\varphi} \left[ \begin{aligned} & M_K S \sin \varphi + M_{Д1} \left( r_1 \sin(\omega_1 t + \varphi + \alpha_0) - \right. \right. \\ & \left. \left. - l_1 \cos \varphi - k_1 \sin \varphi \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + M_{Д2} (r_2 \sin(\omega_2 t + \varphi + \psi_0) + l_2 \cos \varphi - k_2 \sin \varphi) \right) - \right.
 \end{aligned} \right) -
 \end{aligned}$$

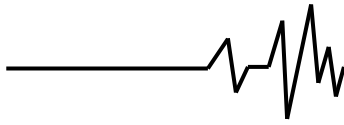


$$\begin{aligned}
 & -(\dot{\varphi})^2 \left( M_K S \cos \varphi + M_{Д1} (r_1 \cos(\omega_1 t + \varphi + \alpha_0) + l_1 \sin \varphi - k_1 \cos \varphi) + \right. \\
 & \left. + M_{Д2} (r_2 \cos(\omega_2 t + \varphi + \psi_0) - l_2 \sin \varphi - k_2 \cos \varphi) \right) + \\
 & - M_{Д1} r_1 \cos(\omega_1 t + \varphi + \alpha_0) (\omega_1^2 + 2\omega_1 \dot{\varphi}) - M_{Д2} r_2 \sin(\omega_2 t + \varphi + \psi_0) (\omega_2^2 + 2\omega_2 \dot{\varphi}) - \\
 & - \frac{C_1}{2} 2 \left( \sqrt{(x_{o3} - b \cos \varphi + f \sin \varphi + b)^2 + \left( y_{o3} - b \sin \varphi - f \cos \varphi + f + L_{np} - \frac{Mg}{c} \right)^2} - L_{np} \right) \times \\
 & \times \left( \frac{y_{o3} - b \sin \varphi - f \cos \varphi + f + L_{np} - \frac{Mg}{c}}{\sqrt{(x_{o3} - b \cos \varphi + f \sin \varphi + b)^2 + \left( y_{o3} - b \sin \varphi - f \cos \varphi + f + L_{np} - \frac{Mg}{c} \right)^2}} - \right. \\
 & \left. - C_2 \left( \sqrt{(x_{o3} + q \cos \varphi + f \sin \varphi - q)^2 + \left( y_{o3} + q \sin \varphi - f \cos \varphi + f + L_{np} - \frac{Mg}{c} \right)^2} - L_{np} \right) \times \right. \\
 & \left. \times \left( \frac{y_{o3} + q \sin \varphi - f \cos \varphi + f + L_{np} - \frac{Mg}{c}}{\sqrt{(x_{o3} + q \cos \varphi + f \sin \varphi - q)^2 + \left( y_{o3} + q \sin \varphi - f \cos \varphi + f + L_{np} - \frac{Mg}{c} \right)^2}} + Mg \right) \times \right. \\
 & \left. \times \sin \left( \sqrt{\frac{c}{M}} (t - u) \right) du, \right.
 \end{aligned}$$

в) вираз для кута повороту робочої камери –  $\varphi = \varphi_0 \cos(\omega_0 t + \theta(t))$ .

Вирази, що формують модель, включають наступні функції:

$$\begin{aligned}
 \omega_0 &= \sqrt{\frac{-C_1(b^2 + af) - C_2(q^2 + af) + g(M_K S - M_{Д1} k_1 - M_{Д2} k_2)}{M_K S^2 + I + M_{Д1}(r^2 + l^2 + k^2)}}, \quad a = L + f - \frac{Mg}{c}, \\
 \theta(t) &= \frac{B}{4 \cdot \varphi_0} \left( l \left( \frac{\cos(\omega_2 t + \psi_0)}{\omega_2} - \frac{\cos(\omega_1 t + \alpha_0)}{\omega_1} \right) + k \left( \frac{\sin(\omega_2 t + \psi_0)}{\omega_2} - \frac{\sin(\omega_1 t + \alpha_0)}{\omega_1} \right) \right) + C^* \\
 \ddot{\varphi} &= -\omega_0^2 \cdot \varphi \left( 1 + B \left( \cos \frac{(\omega_1 + \omega_2)t + \alpha_0 + \psi_0}{2} \left( \sin \frac{(\omega_1 - \omega_2)t + \alpha_0 - \psi_0}{2} + \cos \frac{(\omega_1 - \omega_2)t + \alpha_0 - \psi_0}{2} \right) \right) \right) \\
 B &= \frac{4M_{Д1}r}{M_K S^2 + I + M_{Д1}(r^2 + l^2 + k^2)}, \quad \dot{\varphi} = -\varphi_0 \sin(\omega_0 t + \theta(t)) \times
 \end{aligned}$$



$$\times \left( \omega_0 + \frac{B}{2\varphi_0} \left( \cos \frac{(\omega_1 + \omega_2)t + \alpha_0 + \psi_0}{2} \cdot \left( \sin \frac{(\omega_1 - \omega_2)t + \alpha_0 - \psi_0}{2} + 1 \right) \right) \right)$$

Побудована модель та проведені на її основі дослідження динаміки машини для очищення коренебульбоплодів зекономлять час на проведення дорогих та тривалих експериментальних досліджень, а також дозволять вибрати оптимальні режими очищення для сировини того чи іншого виду.

**Висновок.** Подано конструкцію машини з вібраційним дебалансним приводом та пружинною підвіскою призначену для сухого очищення на транспортування коренебульбоплодів. Невелика направлена сила вібраційних коливань дає змогу: уможливити інтенсивне перемішування коренебульбоплодів між собою в робочій камері машини, забезпечити відповідні зусилля тертя їх поверхонь та очищення з однієї сторони, та запобігає биттю, пошкодженню шкірки та псуванню коренебульбоплодів. Також нерівномірний розподіл вібраційних коливань по довжині робочої камери машини забезпечує направлене переміщення коренебульбоплодів вздовж камери. Відповідно операція очищення поєднана з операцією транспортування. Вібраційний привід машини для сухого очищення вибрано дебалансним. Він має високу експлуатаційну надійність, простоту конструкції та обслуговування. Підвіска машини – пружинного типу, теж характеризується простотою в конструкції, надійністю в експлуатації. Побудована нелінійна математична модель опису руху даної вібраційної машини. Модель дозволяє вивчити вплив на амплітуди та характер коливного руху будь-якої точки робочої камери машини з коренебульбоплодами її кінематичних, силових та геометричних параметрів. Побудовані на основі моделі залежності амплітуди коливань робочої камери від параметрів машини та сировини забезпечать відповідний оптимальний вибір режимів очищення коренебульбоплодів.

#### Список використаних джерел

1. Крисак Ф.М. Напрямки вдосконалення машин для миття коренебульбоплодів / Крисак Ф.М. // 36. наук. праць Вінницького національного аграрного університету. – 2012. – №11 т. 1 (65). – С. 284–288.
2. Всеволодов А.Н. Оптимизация процесса «сухая мойка» корнеплодов / Всеволодов А.Н., Гладушняк А.К. // Харчова наука і технологія. – 2012. – № 3. – С. 83–87.
3. Фльонц, І.В. Удосконалення транспортера-сепаратора для корнеплодів / І.В. Фльонц // Сільськогосподарські машини. 36.

наук. ст. Луцьк: ЛДТУ. – 2013. – вип. 24. – С. 122-128.

4. Механічне обладнання: навч. посібник / Г. М. Постнов, Н. О. Афукова, Д. В. Дмитревський. – Харків : Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі, 2014. – 198 с.

5. Ткаченко, І. Математичне моделювання процесу очищення корнеплодів при їх імпульсному навантаженні / І. Ткаченко, Н. Вивюрка // Вісник ТДТУ. – Тернопіль : ТДТУ. – 2004. – Том 9. № 1. – С. 40-46.

6. V. Topilnytskyu. Modeling the dynamics of vibratory separator of the drum type with concentric arrangement of sieves / V. Topilnytskyu, D. Rebot, M. Sokil, O. Velyka, S. Liaskovska, I. Verkhola, R. Kovalchuk, L. Dzyubuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – VOL2, NO 7(86): Applied Mechanics. — P. 26–35.

7. Стоцько З.А. Математична модель дослідження динаміки вібраційного сепаратора з послідовним розміщенням сит / Стоцько З. А., Топільницький В. Г., Кусий Я. М., Ребот Д. П. // Вібрації в техніці та технологіях. – 2018. – № 2 (89). – С. 49–57.

8. Митропольский Ю. А. Нелинейная механика. Одночастотные колебания. / Ю. А. Митропольский. – К.: Ин-т математики НАН Украины, 1997. – 385 с.

9. Боголюбов Н.Н. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний / Н. Н. Боголюбов, Ю. А. Митропольский. – М.: Физматиз, 1974. – 501 с.

#### References

1. Krysak F.M. (2012). Napriamky vdoskonalennia mashyn dlia myttia korenebulboplodiv [Areas of improvement of machines for washing root crops]. *Zb. nauk. prats Vinnytskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu*, 11, 284-288 [in Ukrainian].
2. Vsevolodov A.N., Hladushniak A.K. (2012). Optymyzatsyia protsessu «sukhaia moika» korneplodov [Optimization of the process of "dry washing" of root crops]. *Kharchova nauka i tekhnolohiia*, 3, 83-87 [in Ukrainian].
3. Flonts, I.V. (2013). Udoskonalennia transporter-separatora dlia koreneplodiv [Improvement of root crop conveyor-separator]. *Silskohospodarski mashyny. Zb. nauk. st. Lutsk: LDTU*, 24, 122-128 [in Ukrainian].
4. H.M. Postnov, N.O. Afukova, D.V. Dmytrevskiy (2014). Mekhanichne obladnannia [Mechanical equipment]. *Kharkiv: Khark. derzh. un-t kharchuvannia ta torhivli* [in Ukrainian].





5. Tkachenko I., Vyviurka N. (2004). Matematychnе modeliuвання protsesu ochyshchennia koreneplodiv pry yikh impulsnomu navantazhenni [Mathematical modeling of roots cleaning process at their impulse loading]. *Visnyk TDTU*, 1, 40-46 [in Ukrainian].

6. Topilnytskyi V., Rebot D., Sokil M., Velyka O., Liaskovska S., Verkhola I., et al. (2017). Modeling the dynamics of vibratory separator of the drum type with concentric arrangement of sieves. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Applied Mechanics*, 86, 26-35.

7. Stotsko Z. A., Topilnytskyi V. H., Kusyi Ya. M., Rebot D. P. (2018). Matematychna model doslidzhennia dynamiky vibratsiinoho separatora z poslidovnym rozmishchenniam syt [A mathematical model for studying the dynamics of a vibration separator with sequential screening]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, 89, 49-57 [in Ukrainian].

8. Mitropolskii Yu. A. (1997). *Nelineynaya mekhanika. Odnochastotnye koljebaniya* [Nonlinear mechanics. Single frequency oscillations]. K.: Ins.matematiki NAN Ukrainy [in Russian].

9. Boholiubov. N.H., Mytropolskyi Yu.A. (1974). *Asymptotycheskye metody v teoryi nelyneinykh kolebaniy* [Asymptotic methods in the theory of nonlinear oscillations]. Moskva: Fyzmatyuz [in Russian].

#### ВИБРАЦИОННАЯ МАШИНА ДЛЯ СУХОГО ОЧИЩЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ КОРНЕКЛУБНЕПЛОДОВ И ЕЕ НЕЛИНЕЙНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Предложено конструкцию вибрационной машины для сухого очищения и транспортировки корнеклубнеплодов различного вида за формой и размером. Машина имеет независимый вибрационный дебалансный привод и пружинную подвеску. Ее оборудовано системой сеток и разделителями сырья для повышения процесса очищения. Машина имеет широкий диапазон изменения кинематических, силовых и геометрических параметров, что дает возможность

регулировать интенсивность процесса очищения в зависимости от типа сырья.

Построена нелинейная математическая модель описания движения данной машины с целью изучения ее динамики и подбора параметров, которые бы обеспечивали максимальную эффективность ее функционирования. Модель является параметризованной и унифицированной. Она представляет собой систему аналитических зависимостей для описания колебательного движения рабочей камеры машины и сырья, которое подвергается очищению, в зависимости от параметров машины.

**Ключевые слова:** сухое очищение, корнеклубнеплоды, математическая модель, вибрационная машина, пружинная подвеска, дебаланс, рабочая камера.

#### VIBRATORY MACHINE FOR ROOT POTATOE CROPS DRY CLEANING AND TRANSPORTING AND ITS NONLINEAR MATHEMATICAL MODEL

The design of a vibrating machine for dry cleaning on the transport of root crops is proposed. The machine has an independent vibrating unbalanced drive and a spring suspension. It is equipped with a grid system and raw grocery separators to improve the efficiency of cleaning process. It has a wide range of changes in kinematic, power and geometric parameters, which regulates the intensity of the purification process depending on the type of raw grocery.

A nonlinear mathematical model of the motion description of this machine was constructed with the aim of studying its dynamics and selection the parameters that would ensure the maximum efficiency of its operation. The model is parametric and unified, and it is a system of analytical dependencies describing the oscillating motion of the working chamber of the machine and the raw material to be cleaned, depending on the machine parameters.

**Key words:** dry cleaning, root crops, mathematical model, vibration machine, spring suspension, debalance, working chamber.

#### Відомості про авторів

**Стоцько Зіновій Антонович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Проектування та експлуатація машин» Національного університету «Львівська політехніка» (вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013, e-mail: stotsko@lp.edu.ua).

**Топільницький Володимир Григорович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Проектування та експлуатація машин» Національного університету «Львівська політехніка» (вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013, e-mail: topilnvol@gmail.com).

**Кусий Ярослав Маркіянович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Технологія



машинобудування» Національного університету «Львівська політехніка» (вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013, e-mail: jarkym@ukr.net).

**Ребот Дарія Петрівна** – кандидат технічних наук, асистент кафедри «Проектування та експлуатація машин» Національного університету «Львівська політехніка» (вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013, e-mail: dasha\_kotlyarova@ukr.net).

**Стоцько Зиновий Антонович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Проектирования и эксплуатации машин» Національного університету «Львовская политехника» (ул. С. Бандеры, 12, г. Львов, Украина, 79013, e-mail: stotsko@lp.edu.ua).

**Топильницький Владимир Григорьевич** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Проектирование и эксплуатация машин» Національного університету «Львовская политехника» (ул. С. Бандеры, 12, г. Львов, Украина, 79013, e-mail: topilnvol@gmail.com).

**Кусый Ярослав Маркиянович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Технология машиностроения» Національного університету «Львовская политехника» (ул. С. Бандеры, 12, г. Львов, Украина, 79013, e-mail: jarkym@ukr.net).

**Ребот Дария Петровна** – кандидат технічних наук, асистент кафедри «Проектирование и эксплуатация машин» Національного університету «Львовская политехника» (ул. С. Бандеры, 12, г. Львов, Украина, 79013, e-mail: dasha\_kotlyarova@ukr.net).

**Stotsko Zinoviy** – Sc. Doctor, Professor, Head of Department “Designing and Operation of Machines” of Lviv Polytechnic National University (12 Bandera str., Lviv, Ukraine, 79013, e-mail: stotsko@lp.edu.ua).

**Topilnytskyi Volodymyr** – PhD, Associate Professor of the Department of Designing and Operation of Machines of the Lviv Polytechnic National University (S. Bandery str., 12, Lviv, Ukraine, 79013, e-mail: topilnvol@gmail.com).

**Kusyi Yaroslav** – PhD, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies of the Lviv Polytechnic National University (S. Bandery str., 12, Lviv, Ukraine, 79013, e-mail: jarkym@ukr.net).

**Rebot Dariya** – PhD, Assistant of the Department of Designing and Operation of Machines of the Lviv Polytechnic National University (S. Bandery str., 12, Lviv, Ukraine, 79013, e-mail: dasha\_kotlyarova@ukr.net).