

*УДК 631.361*

## **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ КОРЕНЕПЛОДІВ З ВИТКОМ ШНЕКА КОМБІНОВАНОЇ ОЧИСНОЇ СИСТЕМИ**

*Труханська О.О*

*Вінницький національний аграрний університет*

*Барановський В.М*

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя*

*Наведені результати аналітичних досліджень процесу контактної взаємодії коренеплодів з витком шнека комбінованої очисної системи. Одержано детерміновану математичну модель, яка характеризує зміну ударного нормального імпульсу залежно від параметрів комбінованої очисної системи та агрофізичних характеристик коренеплодів.*

*The resulted results of analytical researches of process of contact co-operation of root crops are with the coil of screw of the combined cleansing system. The determined mathematical model which characterizes the change of shock normal impulse depending on the parameters of the combined cleansing system and agro physics descriptions of root crops is got.*

### ***Постановка проблеми***

Виробниче застосування відомих очисних робочих органів коренезбиральних машин показав, що вони не завжди забезпечують необхідної якості роботи (пошкодження коренеплодів – до 40 %) і у них неповністю розкриті переваги принципу та ефекту косого співудару коренеплодів з робочими поверхнями, під час якого забезпечується їх мінімізація пошкоджень при задовільних показниках сепарації вороху [1].

Зниження загальних пошкоджень коренеплодів з одночасним підвищенням основних показників якості роботи коренезбиральних машин досягається шляхом реалізації технологічного процесу очищення вороху коренеплодів з застосуванням комбінованої очисної системи (КОС) [2]. Інтенсифікація процесу відокремлення землі та рослинних домішок від коренеплодів відбувається за рахунок встановлення шнека під кутом до напрямку руху вороху та додаткової динамічної дії пружних очисних елементів шнекового конвеєра на компоненти вороху.

### ***Аналіз останніх досліджень і публікацій***

Результати досліджень, які наведені у працях [3, 4, 5], відносилися до встановлення теоретичного аналізу процесу взаємодії коренеплодів з робочими поверхнями гвинтового конвеєра, який встановлено перпендикулярно напрямку руху вороху, тому виникла необхідність проведення аналізу процесу роботи удосконаленого очисного робочого органу.

### ***Мета дослідження***

Метою даних досліджень є подальший розвиток методики оптимізації параметрів і режимів роботи комбінованих очисників вороху коренеплодів.

### Результати дослідження

Ступінь пошкодження коренеплодів при контактній взаємодії з витком шнека доцільно оцінювати значенням ударного імпульсу  $\vec{S}$ , який виникає в результаті контакту, при цьому згідно з [6] у загальному випадку зміна кількості руху тіла при ударі дорівнює  $\vec{S} = m(\vec{V} - \vec{V}_p)$ , де  $m$  – приведена маса тіла у точці контакту;  $V_p$ ,  $V$  – відповідно швидкість тіла до та після удару, а вектор ударного імпульсу  $\vec{S}$  направлений до нормалі тіл у точці контакту.

Згідно з дослідженнями [1] при ударі не пружних тіл відбувається втрата кінетичної енергії  $\Delta K$ , витраченої на залишкову деформацію, яка викликає порушення кліткової структури коренеплоду або його пошкодження.

При цьому знизити втрати  $\Delta K$  або зменшити ударний імпульс, що рівнозначно зменшенню пошкодження коренеплодів, можливо за рахунок зменшення сумарної швидкості співудару, або маси коренеплоду та підвищення пружних властивостей коренеплодів, або збільшення коефіцієнта відновлення  $\varepsilon$ .

Результатом дії залишкової деформації, яка викликана нормальним і тангенціальним ударним імпульсом, є відповідно поява тріщин, розколювання тіла коренеплодів або обдирання шкірки тіла коренеплодів, тобто негативний ефект від дії нормального ударного імпульсу набагато вагоміший ніж дія тангенціального ударного імпульсу.

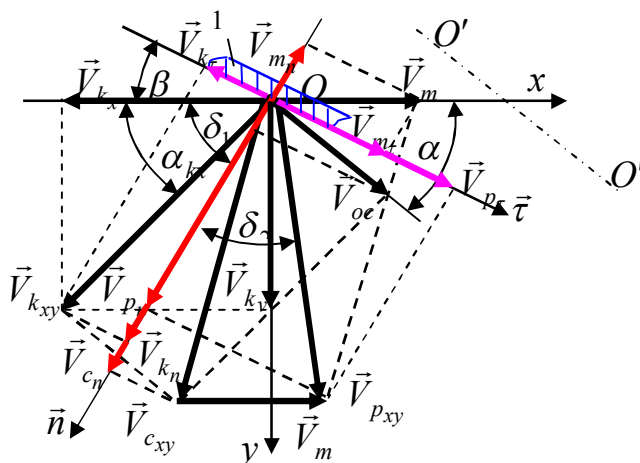


Рис. 1. Схема косої співудару коренеплоду з витком

Зменшення нормального ударного імпульсу або в нашому випадку результуючої швидкості співудару коренеплоду з витком шнека  $V_p$  можливе за рахунок зменшення нормальної складової  $V_p$ , коефіцієнта відновлення  $\varepsilon$  і кута нахилу поверхні співудару [7] або переходом від прямого удару до косої.

Згідно з відомою теорією удару [8] ударний імпульс можна знайти, якщо відомі такі величини, як коефіцієнт відновлення  $\varepsilon$  при ударі коренеплоду з витком шнека та кут між напрямком і площиною удару. Для знаходження даних величин ще раз розглянемо процес взаємодії коренеплоду з витком шнека або складену еквівалентну схему процесу, яка наведена на рис. 1.

Коренеплід зі швидкістю  $V_m$  співударяється з поверхнею витка 1 в точці контакту  $O$

під кутом  $\delta_1$  до нормалі  $n$  та в подальшому відбивається від поверхні витка під кутом  $\delta_2$  до нормалі  $n$  із результируючою швидкістю  $V_p$ , проекція якої на горизонтальну площину  $xOy$  дорівнює  $V_{p_{xy}}$ .

При цьому згідно з [8] ударний імпульс визначається виразом

$$\vec{S} = \lim_{t \rightarrow 0} \int_0^t \vec{F}_y dt, \quad (1)$$

де  $\vec{F}_y$  – вектор ударної сили;  $t$  – тривалість ударного контакту, с.

Враховуючи, що тривалість ударного контакту  $t$  дуже мала [8], тоді імпульс всіх інших сил, які діють на тіло коренеплоду в момент удару, практично дорівнює нулю.

Для опису процесу ударного контакту коренеплоду з витком шнека виберемо систему координат  $\vec{\tau}O\vec{n}$  (рис. 1), де вісь  $O\vec{\tau}$  направимо по дотичній до тіла коренеплоду в точці контакту  $O$ , а вісь  $O\vec{n}$  – по нормалі, яку проведено до площини контакту. Дана система координат є наслідком повороту осей вибраної системи координат  $xOy$  за часовою стрілкою на кут підйому гвинтової лінії  $\beta$  або так, щоб вісь  $Oy$  збігалася з нормаллю  $NN$  (рис. 1), яку проведено до гвинтової поверхні в точці контакту  $O$ .

Згідно з цим, для нашого випадку взаємодії коренеплоду з витком шнека КОС можна записати

$$\vec{S}_n = m_k (\vec{V}_p - \vec{V}_m), \quad (2)$$

де  $m_k$  – приведена маса коренеплоду у точці його контакту  $O$  з витком шнека КОС, а вектор ударного імпульсу  $\vec{S}$  направлений до нормалі  $\vec{n}$  (рис. 1) витка 1 шнека та тіла коренеплоду в точці контакту  $O$ .

Запишемо рівняння (2) у проекціях на осі  $\vec{\tau}$  і  $\vec{n}$

$$\left. \begin{aligned} m_k V_{p_\tau} - m_k V_{m_\tau} &= 0; \\ m_k V_{p_n} - m_k V_{m_n} &= S_n \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

або

$$(\vec{V}_{k_n} - \vec{V}_{m_n}) + \vec{V}_{oc_n} = \vec{S}_n / m_k. \quad (4)$$

де  $\vec{S}_n$  – вектор нормального ударного імпульсу.

При цьому маємо

$$V_{k_n} = V_{k_{xy}} \sin(\delta_1 - \alpha_{kx}); \quad V_{m_n} = V_m \sin\beta; \quad (5)$$

$$V_{oc_n} = V_{oc_n} \sin[\pi/2 - (\alpha - \beta)] = V_{oc} \cos(\alpha - \beta), \quad (5')$$

де  $\delta_1 = \pi/2 - \beta$  – кут між напрямками вектора  $\vec{V}_{c_n}$  та осі  $Ox$ ;  $\alpha_{kx} = \pi/2 - \alpha$  – кут між

напрямками вектора  $\vec{V}_{k_{xy}}$  та осі  $Ox$ , при цьому  $\cos(\delta_1 - \alpha_{kx}) = \sin(\alpha - \beta)$ ;  $\alpha$  – кут

встановлення шнека відносно напрямку  $V_m$ , град.

Підставивши значення складових у рівняння (2) одержимо залежність для визначення нормального ударного імпульсу  $S_n$  процесу контактної взаємодії коренеплодів із витком шнека

$$S_n = m_k \sqrt{(V_{k_{xy}}^2 + V_{oc}^2) \sin^2(\alpha - \beta) - V_m^2 \sin^2 \beta \left( \frac{2V_{k_{xy}} \cos(\alpha - \beta)}{V_m \sin \beta} - 1 \right)}, \quad (6)$$

або згідно з тим, що  $V_{k_{xy}} = V_k \cos \varphi$  та після спрощення одержано диференціальне рівняння, яке характеризує зміну нормального ударного імпульсу  $S_n$  процесу контактної взаємодії коренеплодів із витком шнека залежно від параметрів КОС

$$S_n = 0,5m_k \sqrt{D^2 \theta \sin^2(\alpha - \beta) \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 - D_m^2 \left( \frac{d\varphi_m}{dt} \right)^2 \left( \frac{2D \cos \varphi \cos(\alpha - \beta)}{D_m \sin \beta} \frac{d\varphi}{d\varphi_m} - 1 \right) \sin^2 \beta}, \quad (7)$$

$$S_n = m_k \sqrt{0,25 D^2 \omega^2 \theta \sin^2(\alpha - \beta) - V_m^2 \left( \frac{D \omega \sin \varphi \cos(\alpha - \beta)}{V_m \sin \beta} - 1 \right) \sin^2 \beta}, \quad (8)$$

де  $D$ ,  $D_m$  – зовнішній діаметр шнека та діаметр барабана приводного вала транспортера, м;  $\theta = \cos^2 \varphi + k_V^2 \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_k}{2} \right)$ ;  $k_V$  – коефіцієнт, який враховує зниження швидкості переміщення вороху  $V_{oc}$  відносно теоретичної швидкості переміщення витків шнека  $V_o$ ;  $\varphi$ ,  $\varphi_m$  – кут повороту шнека та барабана приводного вала транспортера, рад.;  $\omega$  – кутова швидкість шнека, рад/с

Наведена залежність (7) є детермінованою математичною моделлю, яка характеризує зміну нормального ударного імпульсу від параметрів КОС та агрофізичних характеристик коренеплодів.

Для практичного використання залежності (8) доцільно виразити кутову швидкість шнека  $\omega$  через частоту обертання шнека  $n$  (об/с), при цьому  $\omega = 2\pi n$ , а масу коренеплоду – через об'єм коренеплоду  $V_{m.k}$  та питому масу коренеплоду  $\rho_k$

Тоді залежність (8) матиме вигляд:

$$S_n = V_{m.k} \rho_k \sqrt{\pi^2 D^2 n^2 \theta \sin^2(\alpha - \beta) - 2V_m^2 \left( \frac{D \pi n \sin \varphi \cos(\alpha - \beta)}{V_m \sin \beta} - 1 \right) \sin^2 \beta}. \quad (8)$$

При прийнятих початкових умовах  $\varphi = \pi/4$ ,  $\beta = \pi/6$ ,  $\alpha = \pi/5$ ,  $k_V = 0,7$  і  $V_m = 1,6$  м/с згідно з (8) побудовано поверхню зміни нормального ударного імпульсу  $S_n$  залежно від діаметра шнека  $D$  і кутової швидкості шнека  $\omega$  та залежності зміни  $S = f(\omega)$ ,  $S = f(\alpha)$ , які наведено на рис. 3(а) і 3(б).

На основі проведених експериментальних досліджень [9] було встановлено, що допустима середня статистична швидкість прямого центрального удару  $[V_{max}]$  коренеплодів кормових і цукрових буряків із металевою поверхнею при початковій швидкості контактної взаємодії коренеплодів  $V_n = 1,6$  м/с становить 3,1 м/с.

Тоді допустимий нормальний ударний імпульс сили  $[S_n]$  контактної взаємодії

коренеплодів масою  $m_k$  із витком шнека КОС відповідно повинен бути не більшим  $[S_n^{0,7}] \leq 2,2$  (кг м/с),  $[S_n^{1,2}] \leq 3,7$  (кг м/с),  $[S_n^{1,7}] \leq 5,3$  (кг м/с).

Зміна нормального ударного імпульсу  $S_n$  залежно від параметрів КОС має

прямопропорційний характер – зі збільшенням основних параметрів шнека (кутової швидкості шнека  $\omega$ , діаметра шнека  $D$ , кута встановлення шнека  $\alpha$ ) нормальний ударний імпульс  $S_n$  зростає та знаходиться в межах від 1,5...15 (кг·м/с) залежно від маси коренеплодів  $m_k$  і відповідних значень  $\omega$ ,  $D$  і  $\alpha$ .

Тоді на основі проведеного аналізу графічного відтворення зміни нормального ударного імпульсу  $S_n$  (рис. 2, рис. 3), який виникає в результаті контактної взаємодії коренеплодів з витком шнека можна встановити межі зміни основних параметрів КОС при значеннях яких буде виконуватися умова  $[S_n^{0,7}] \leq 2,4$  (кг·м/с),  $[S_n^{1,2}] \leq 4,1$  (кг·м/с),  $[S_n^{1,7}] \leq 5,8$  (кг·м/с).

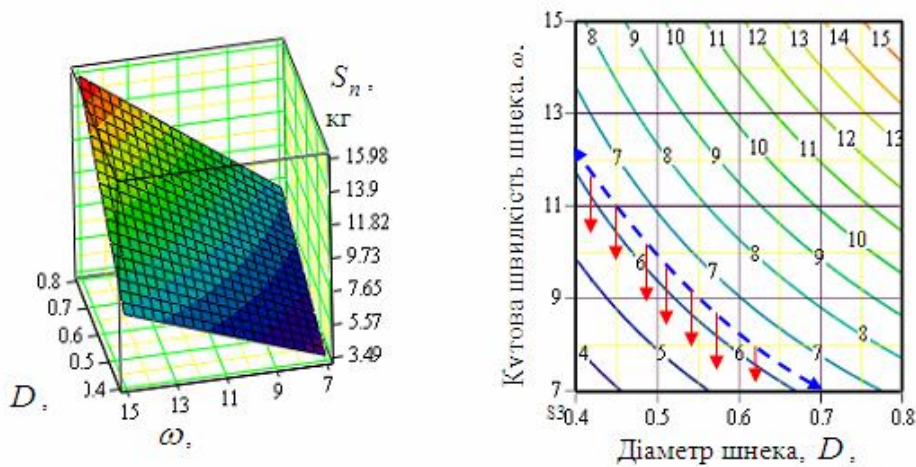


Рис. 2. Поверхня зміни нормального ударного імпульсу  $S_n$  як функціонал  $S_n = f(d, \omega)$  для  $m_k = 1,7$  кг

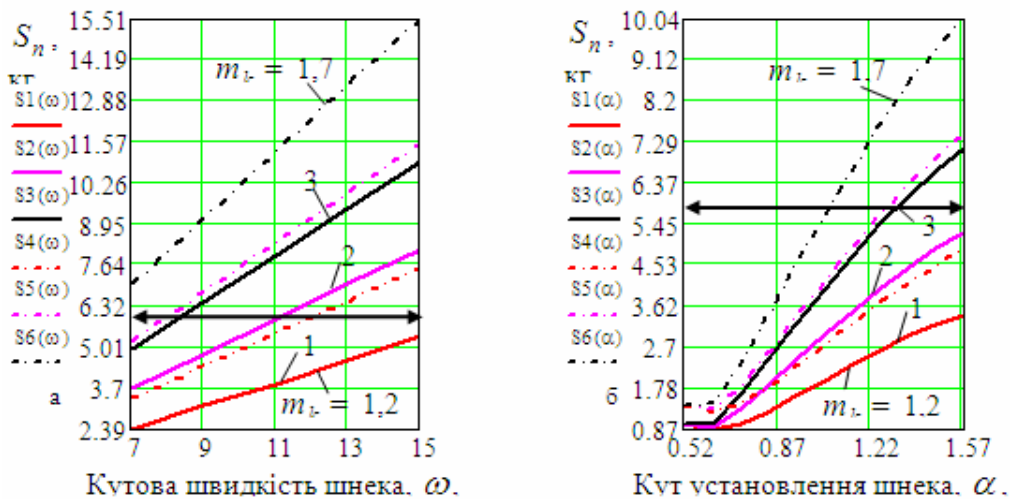


Рис. 3. Залежність нормального ударного імпульсу  $S_n$  як функціонала:  
а –  $S_n = f(\omega)$ ,  $\alpha = \pi/4$ ; б –  $S_n = f(\alpha)$ ,  $\omega = 11$  рад/с;  
1, 2, 3 – відповідно для  $D = 0,4; 0,6; 0,8$  (м)

При забезпеченні даної умови в процесі роботи КОС (під час контактного удару коренеплодів з витком шнека КОС) коренеплоди будуть отримувати пошкодження, які не перевищуватимуть межу, встановлену згідно з агротехнічними вимогами до КМ, тобто буде забезпечуватися раціональний режим роботи КОС.

У зв'язку з цим встановлено раціональні режими роботи КОС при яких значення нормального ударного імпульсу  $S_n$  не перевищує допустимі значення  $[S_n^i]$  або забезпечується умова  $S_n^i \leq [S_n^i]$ :

- для коренеплодів масою  $m_k = 0,7$  кг у межах зміни  $0,4 \leq D \leq 0,65$  (м), кутової швидкості шнека  $7 \leq \omega \leq 11,5$  (рад/с) та кута встановлення шнека  $\alpha \leq 80$  град;

- для коренеплодів масою  $m_k = 1,2$  кг у межах зміни  $0,4 \leq D \leq 0,65$  (м), кутової швидкості шнека  $7 \leq \omega \leq 11,5$  (рад/с) та кута встановлення шнека  $\alpha \leq 70$  град;

- для коренеплодів масою  $m_k = 1,7$  кг у межах зміни  $0,4 \leq D \leq 0,65$  (м), кутової швидкості шнека  $7 \leq \omega \leq 11,5$  (рад/с) та кута встановлення шнека  $\alpha \leq 60$  (град).

Таким чином можна констатувати, що у межах зміни основних масових характеристик коренеплодів масою  $m_k = 0,7...1,7$  (кг) значення допустимого нормального ударного імпульсу  $S_n$  забезпечується при значеннях діаметра шнека  $0,4 \leq D \leq 0,65$  (м), кутової швидкості шнека  $7 \leq \omega \leq 11,5$  (рад/с) та кута встановлення шнека  $\alpha \leq 60$  град.

### Висновки

Наведена детермінована математична модель процесу контактної взаємодії коренеплоду з витком шнека, який встановлено під кутом до напрямку руху вороху може бути використана в процесі розробки робочих органів для очищення вороху коренеплодів від домішок і оптимізації їх конструктивно – технологічних параметрів.

### Література

1. Погорельый Л.В. Свеклоуборочные машины: история, конструкция, теория, прогноз / Л.В. Погорельый, М.В. Татьянко – К. : Феникс, 2004. – 232 с.
2. Пат. № 65050 Україна. МПК А 01D 33/08. Очисна система вороху коренеплодів / Барановський В.М., Підгурський М.І., Труханська О.О., Паньків М.Р.; заявник і власник Тернопільський держав. техніч. університет ім. І. Пулюя. – № u201105238 ; заявл. 26.04.11 ; опубл. 25.11.11. Бюл. № 22.
3. Булгаков В.М. Теория свеклоуборочных машин : Монография / В.М. Булгаков, М.И. Черновол, Н.А. Свирень. – Кировоград : "КОД", 2009. – 256 с.
4. Аванесов Ю.Б. Свеклоуборочные машины / Ю.Б. Аванесов, В.И. Бессарабов, И.И. Русанов. – М., 1979. – 351 с.
5. Аналіз процесу взаємодії коренеплоду з витком шнека / Н.А. Дубчак, В.М. Барановський, В.Б. Онищенко [та ін.] // Вісник ТНТУ. – Тернопіль, 2011. – Т. 12, № 2. – С. 109–118.
6. Добронравов В.В. Курс теоретической механики : [учебник для вузов, 3-е изд., перераб.] / В.В. Добронравов, Н.Н. Никитин, А.Л. Дворников. – М. : Высшая школа, 1974. – 528 с.
7. Яблонский А.А. Курс теоретической механики : [учебник для вузов, часть 2, 4-е изд.] / Яблонский А.А.. – М. : Высшая школа, 1971. – 347 с.
8. Бутенин Н.В. Курс теоретической механики : [учебник, том II. : Динамика, 3-е изд., исправл.] / Н.В. Бутенин, Я.Л. Луиц, Д.Р. Меркин. – М. : Наука, 1985. – 496 с.
9. Дубчак Н.А. Обґрунтування параметрів та режимів роботи очисника вороху кормових буряків : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.11 «Машины і засоби механізації сільськогосподарського виробництва» / Н.А. Дубчак. – Тернопіль, 2011. – 20 с.