

УДК 631.361

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ КОПІЮВАННЯ ГОЛОВОК КОРЕНЕПЛОДІВ КОПРОМ ПАСИВНОГО ДООБРІЗЧИКА ЗАЛИШКІВ ГИЧКИ

Смаль М.В.

Герасимчук О.О.

Луцький національний технічний університет

Барановський В.М.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Наведені результати аналітичних досліджень процесу копіювання головок коренеплодів копіром пасивного дообрізчика залишків гички. Одержано детерміновані математичні моделі, які характеризують умову невивалювання коренеплодів з ґрунту та їх непошкодження копіром пасивного дообрізчика залишків гички залежно від конструктивних параметрів копіра та швидкості руху гичкозбиральної машини, або в загальному – залежно від конструктивно-технологічних параметрів процесу копіювання головок коренеплодів.

The results of analytical research process heads up roots copier passive doobrizchyka residues tops. Obtained deterministic mathematical models that characterize the condition nevyvalyuvannya roots from the soil and their neposhkodzhennya copier passive doobrizchyka residues tops depending on the design parameters and copier speed hychkozbyralnoyi machine, or in general - depending on structural and technological parameters of the process heads up roots.

Постановка проблеми

На сучасному етапі гичку коренеплодів збирають однофазним або двофазним способами. Однофазний спосіб зрізу основного масиву гички і головок коренеплодів з залишками гички на них здійснюється одним ріжучим апаратом. Двофазний спосіб збирання гички характеризується попереднім зрізуванням основного масиву гички без копіювання головок коренеплодів роторним ріжучим апаратом (перша фаза) та подальшим дообрізуванням головок коренеплодів з залишками гички на них іншим робочим органом [1].

Основним недоліком однофазного способу збирання гички є те, що при копіюванні головки коренеплоду між копіром і головкою, як правило завжди присутній прошарок незрізаної гички різної товщини, навіть на одному і тому ж агрофоні. Це не дозволяє встановити ніж ріжучого апарату на задану висоту зрізу, що призводить до втрат цукрової сировини, які досягають 10% [2].

При двофазному способі відокремлення залишків гички з головок коренеплодів дообрізка головок здійснюється безпосередньо під час їх контакту з копіром, що значно зменшує цукрової сировини за рахунок більш точного виконання заданої висоти зрізу.

Двофазний спосіб збирання гички цукрових буряків широко розповсюджений за кордоном і знаходить все більше застосування в Україні. Зріз гички при цьому способі здійснюється, в основному, закріпленими на приводному горизонтальному валу шарнірними ножами, а копіювання та зрізування головок коренеплодів з залишками гички – дообрізчиком головок коренеплодів типу пасивний копір – пасивний ніж.

Умова невивалювання коренеплодів з ґрунту характеризується допустимою сумарною горизонтальною силою, а умова не пошкодження – допустимими напруженнями, які виникають під час контакту робочої поверхні копіра пасивного дообрізчика залишків гички з головою коренеплоду [3, 4].

Для розрахунку сумарної допустимої горизонтальної сили та допустимого напруження контакту копіра з головою коренеплодів розглянемо аналітичний процес взаємодії копіра з головою коренеплоду, який контактує з нерухомим коренеплодом.

Складена еквівалентна схему процесу взаємодії двох тіл – пасивного гребінчастого копіра та головки коренеплоду, умовно закріпленого у ґрунті, наведена на рис. 1, при цьому: початок відліку вибраної системи координат XOY розміщено у точці O , або точці контакту робочої поверхні копіра з головою коренеплоду; вісь OX направлено вздовж напрямку руху копіра, а вісь OY – перпендикулярно до дотичної, яку проведено у точці контакту O .

Під час контакту копіра 5 з головою 7 коренеплоду 8 зі швидкістю руху гичкозбиральної машини V_k відбувається удар, у процесі якого на головку коренеплоду в точці O діють наступні сили:

- сила удару P_y копіра, яка виникає під час взаємодії робочої поверхні копіра з головою коренеплоду з початковою швидкістю удару V_k , Н;

- складова P_n (Н) сили стиснення P'_n пружини 9, яка примусово прижимає копір до головки коренеплоду (регулюється силою стиснення P'_n пружини 9 за допомогою переміщення регульовальної тяги 10);

- сумарна складова $\sum_{i=1}^{n_R} P_{R_i}$ (Н) сумарної сили тертя $\sum_{i=1}^{n_R} P'_{R_i}$ поворотних пар «палець-втулка» шарнірів 11 паралелограмної підвіски 2 дообрізчика, або яка враховує силу тертя в шарнірах 11 паралелограмної підвіски 2, що перешкоджає вільному поступальному руху копіра вгору.

Для того, щоб коренеплід не вивалювався із ґрунту, або не був вибитий із нього та не пошкоджувався під час удару робочої поверхні копіра по головці коренеплоду, необхідно забезпечити наступні умови

- для умови невивалювання коренеплодів з ґрунту копіром пасивного дообрізчика залишків гички

$$\sum_{i=1}^3 P_c \leq [P_{c.max}] = \sum_{i=1}^3 Q_{y.n} \sin \varepsilon \leq [P_{c.max}], \quad (1)$$

де $\sum_{i=1}^3 P_c$ – сумарна горизонтальна сила, яка діє на головку коренеплоду, Н; $[P_{c.max}]$ –

максимально допустима горизонтальна сила, Н; $\sum_{i=1}^3 Q_{y.n}$ – сумарна узагальнена нормальна

сила, яка діє на головку коренеплоду під час удару копіра, Н; ε – кут між напрямками осі OX та сумарною горизонтальною силою $\sum_{i=1}^3 P_c$, яка діє на головку коренеплоду, град.

- для умови непошкодження коренеплодів копіром дообрізчика залишків гички

$$\sigma_{c.n} \leq [\sigma_{n.max}] = \frac{\sum_{i=1}^3 Q_{y.n}}{S_k} \leq [\sigma_{n.max}], \quad (2)$$

де $\sigma_{c.n}$ – нормальні напруження, які виникають під час удару копіра з нерухомою головкою коренеплоду, Па; $[\sigma_{n.max}]$ – максимально допустимі нормальні напруження, Па; S_k – площа контакту робочої поверхні копіра з головкою коренеплоду під час удару, м².

Згідно з рис. 1 узагальнена нормальна сила $Q_{y.n}$ складається з алгебраїчної суми проєкцій всіх сил на вісь OY , які прикладені у точці контакту O

Тоді згідно з рис. 2 залежності (1) і (2), які характеризують умови невивалювання коренеплодів з ґрунту та їх непошкодження копіром пасивного дообрізчика залишків гички, запишемо у наступному векторному вигляді

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^3 \hat{P}_c \sin \varepsilon \leq [\hat{P}_{c.max}] &= \left(\hat{P}_y + \hat{P}_n + \sum_{i=1}^{n_R} \hat{P}_{R_i} \right) \sin \varepsilon \leq [\hat{P}_{c.max}] \\ \sum_{i=1}^3 \hat{P}_c / S_k \leq [\sigma_{n.max}] &= \left(\hat{P}_y + \hat{P}_n + \sum_{i=1}^{n_R} \hat{P}_{R_i} \right) / S_k \leq [\sigma_{n.max}] \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

Векторне значення сили удару \hat{P}_y копіра, яка виникає під час взаємодії робочої поверхні пасивного копіра дообрізчика з головкою коренеплоду залежить від початкової швидкості удару V_k і сили ваги копіра та згідно з [6] визначається за формулою

$$\hat{P}_y = \sqrt{(\hat{P}_{V_k})^2 + (\hat{P}_g)^2} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n_k} m_i \right)^2 \left(\frac{d^2 L}{dt^2} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{n_k} m_i \right)^2 g^2} = \sum_{i=1}^{n_k} m_i \sqrt{\left(\frac{dV_k}{dt} \right)^2 + g^2}, \quad (3)$$

де \hat{P}_{V_k} – вектор горизонтальної сили, яка виникає під час удару копіра по головці коренеплоду з початковою швидкістю контакту V_k ; $\hat{P}_g = \sum_{i=1}^{n_k} m_i g$ – вектор сила ваги рухомих частин дообрізчика гички; $\sum_{i=1}^{n_k} m_i$ – сумарна маса рухомих частин дообрізчика, кг ($i = 1, 2, \dots, n_k$); g – прискорення вільного падіння, м/с²; L, V_k – переміщення (м) та поступальна швидкість (м/с) гичкозбиральної машини або копіра.

Для знаходження сумарної узагальненої нормальної сили $\sum_{i=1}^3 Q_{y.n}$ складемо векторне диференціальне рівняння руху копіра на основі застосування другого закону Ньютона [6]

$$\sum_{i=1}^{n_k} m_i \frac{dV^{\omega}}{dt} = \sum_{i=1}^3 Q_{y.n} = \sum_{i=1}^{n_k} m_i dV = \sum_{i=1}^3 Q_{y.n} dt. \quad (4)$$

Інтегруючи рівняння (2.29) від $t = 0$ (початок удару) до $t = t_n$ (час закінчення удару), де t_n – час дії удару (с), будемо мати

$$\int_{V_k}^{V_n} \sum_{i=1}^{n_k} m_i dV = \int_0^{t_n} \sum_{i=1}^3 Q_{y.n} dt, \quad (5)$$

або згідно з (2-4) маємо

$$\sum_{i=1}^{n_k} m_i |\Delta V_i^p| \sin \hat{\varepsilon} = \left(\int_0^{t_n} \sum_{i=1}^{n_k} m_i \sqrt{\left(\frac{dV_k^p}{dt} \right)^2 + g^2} + \int_0^{t_n} P_n dt + \int_0^{t_n} \sum_{i=1}^{n_R} P_{R_i} dt \right) \sin \hat{\varepsilon} \leq [P_{c.max}]; \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{n_k} m_i |\Delta V_i^p| / S_k = \left(\int_0^{t_n} \sum_{i=1}^{n_k} m_i \sqrt{\left(\frac{dV_k^p}{dt} \right)^2 + g^2} + \int_0^{t_n} P_n dt + \int_0^{t_n} \sum_{i=1}^{n_R} P_{R_i} dt \right) / S_k \leq [\sigma_{n.max}]; \quad (7)$$

де $\Delta V^p = V_n^p - V_k^p$, при цьому під час пружного удару двох тіл згідно з [6] $V_n = kV_k$; V_n, V_k – швидкість копіра після удару та початкова швидкість удару копіра, м/с; k – коефіцієнт відновлення.

Сила стиснення циліндричної гвинтової пружини P'_n згідно з [7] визначається за законом Гука

$$P'_n = c \Delta x = \frac{G d_n^4}{8 D_n^3 z} \Delta x, \quad (8)$$

де c – коефіцієнт пружності матеріалу пружини; Δx – абсолютне стиснення пружини, мм; G – модуль зсуву матеріалу з якого виготовлено пружину, Н/мм²; d_n – діаметр матеріалу з якого виготовлено пружину, мм; D_n – середній діаметр пружини, мм; z – кількість витків пружини, шт.

Приймаючи, що конструктивний параметр φ_k , або кут нахилу поздовжніх осей тяг 3, 4 (рис. 1) паралелограмного механізму 2 дообрізчика та конструктивний параметр ε , або кут нахилу робочої поверхні копіра 1 рівні між собою, тобто $\varphi_k = \varepsilon$, або адекватно, що поздовжні осі тяг і прямолінійна плоско робоча поверхня копіра паралельні одна одній, можна записати, що складова P_n , яка примусово прижимає копір до головки коренеплоду за рахунок сили стиснення P'_n пружини 9 визначається за формулою

$$P_n = \frac{G d_n^4}{8 D_n^3 z} \Delta x \sin \beta, \quad (9)$$

де β – кут між регулювальною тягою 10 та нижньою тягою 4, град.

Векторне значення сумарної сили тертя \check{P}'_R однієї поворотної пари «палець-втулка» шарніра 11 паралелограмної підвіски 2 дообрізчика згідно з [8] та рис. 1 визначається за формулою

$$\check{P}'_R = \check{F}'_m + \check{F}'_n, \text{ або } P'_R = \sqrt{(F'_m)^2 + (F'_n)^2}, \quad (10)$$

де P'_R – сумарне значення сили тертя однієї поворотної пари «палець-втулка» шарніра 11 паралелограмної підвіски 2 дообрізчика, Н; $F'_m = f F'_n = 2 f p_0 l R_n$ – сила тертя однієї поворотної пари «палець-втулка» шарніра 11 паралелограмної підвіски 2 дообрізчика (Н); f' – зведений коефіцієнт тертя пальця по втулці; $F'_n = 0,5 \pi l R_o$ – сила нормального тиску, Н; f – коефіцієнт тертя пальця по втулці; p_0 – питомий розподіл тиску на площі контакту, Н/м²; l – довжина втулки, м; R_n – радіус втулки, м;

Тоді сумарна складова $\sum_{i=1}^{n_R} P_{R_i}$, яка враховує силу тертя в шарнірах 11 паралелограмної підвіски 2, що перешкоджає вільному поступальному руху копіра вгору визначається за формулою (рис. 2)

$$\sum_{i=1}^{n_R} P_{R_i} = \sum_{i=1}^{n_R} P'_{R_i} \cos(\gamma - \varepsilon) = \sum_{i=1}^{n_R} p_{o_i} l R_n \sqrt{4f^2 + 0,25\pi^2} \cos(\gamma - \varepsilon). \quad (11)$$

Враховуючи залежності (1), (2) і (9), (11) умову невивалювання коренеплодів з ґрунту та їх непошкодження копіром пасивного дообрізчика залишків гички, запишемо у наступному вигляді

$$\sum_{i=1}^{n_k} m_i |\Delta V| \sin \varepsilon = \left(\int_0^{t_n} \sum_{i=1}^{n_k} m_i \sqrt{\left(\frac{dV_k^p}{dt}\right)^2 + g^2} + \int_0^{t_n} \frac{Gd_n^4}{8D_n^3 z} \Delta x \sin \beta dt + \int_0^{t_n} \sum_{i=1}^{n_R} p_{o_i} l_n r_n \sqrt{4f^2 + 0,25\pi^2} \cos(\gamma - \varepsilon) dt \right) \sin \varepsilon \leq [P_{c.max}]; \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{n_k} m_i |\Delta V| S_k = \left(\int_0^{t_n} \sum_{i=1}^{n_k} m_i \sqrt{\left(\frac{dV_k^p}{dt}\right)^2 + g^2} + \int_0^{t_n} \frac{Gd_n^4}{8D_n^3 z} \Delta x \sin \beta dt + \int_0^{t_n} \sum_{i=1}^{n_R} p_{o_i} l_n r_n \sqrt{4f^2 + 0,25\pi^2} \cos(\gamma - \varepsilon) dt \right) / S_k \leq [\sigma_{n.max}]. \quad (13)$$

Одержані теоретичні інтегральні рівняння (12) і (13) є математичними детермінованими моделями, які характеризують умову невивалювання коренеплодів з ґрунту та їх непошкодження копіром пасивного дообрізчика залишків гички залежно від конструктивних параметрів копіра та швидкості руху гичкозбиральної машини, або в загальному – залежно від конструктивно-технологічних параметрів процесу копіювання головок коренеплодів.

Для практичного використання одержаних детермінованих математичних моделей (12) і (13) необхідно визначити час удару t_n , або час взаємодії копіра з головкою коренеплоду.

Час удару t_n визначимо з наступних міркувань.

Згідно з [8], відстань L , яку проходить точка O (рис. 1) за час удару визначається за формулою

$$L = \int_0^{t_n} V'_k dt, \text{ або } L = V'_{c.k} t_n, \quad (14)$$

де V'_k – перемінна швидкість точки в проміжку часу $(0, t_n)$, м/с; $V'_{c.k}$ – кінцева величина згідно теореми про середнє [8], м/с.

Тоді, якщо прийняти положення, що на одному погонному метрі рядка рослин знаходиться N (шт.) коренеплодів, а копір рухається поступально та рівномірно зі швидкістю гичкозбиральної машини V_k , то за проміжок часу рівний $t = 1$ с копір пройде шлях $L = tV_k = 1V_k$ і на протязі якого відбудеться ударний контакт з NV_k коренеплодами, а час ударного контакту t_n (с) з одним коренеплодом буде дорівнювати

$$t_n = 1 / NV_k. \quad (15)$$

Крім того, згідно теореми про середнє інтегрального числення [9], розв'язок

детермінованих математичних моделей (12) і (13) наступний

$$\sum_{i=1}^{n_k} m_i |\Delta V| \sin \varepsilon = \left(\int_0^{t_n} \sum_{i=1}^{n_k} m_i \sqrt{\left(\frac{dV_k^p}{dt}\right)^2 + g^2 + \left[\frac{Gd_n^4}{8D_n^3 z} \Delta x_c \sin \beta\right]_0^{t_n}} + \left[\sum_{i=1}^{n_R} p_{0c_i} l_n r_n \sqrt{4f^2 + 0,25\pi^2 \cos(\gamma - \varepsilon)} \right]_0^{t_n} \right) \sin \varepsilon \leq [P_{c.max}^p]; \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^{n_k} m_i |\Delta V| S_k = \left(\int_0^{t_n} \sum_{i=1}^{n_k} m_i \sqrt{\left(\frac{dV_k^p}{dt}\right)^2 + g^2 + \left[\frac{Gd_n^4}{8D_n^3 z} \Delta x_c \sin \beta\right]_0^{t_n}} + \left[\sum_{i=1}^{n_R} p_{0c_i} l_n r_n \sqrt{4f^2 + 0,25\pi^2 \cos(\gamma - \varepsilon)} \right]_0^{t_n} \right) / S_k \leq [\sigma_{n.max}], \quad (17)$$

або після підстановки значення (15) в (16), (17) одержимо

$$\sum_{i=1}^{n_k} m_i |\Delta V| \sin \varepsilon = \left(\sum_{i=1}^{n_k} m_i \sqrt{\left(\frac{dV_k^p}{dt}\right)^2 + g^2 + \frac{Gd_n^4}{8D_n^3 z} \Delta x_c \sin \beta} + \sum_{i=1}^{n_R} p_{0c_i} l_n r_n \sqrt{4f^2 + 0,25\pi^2 \cos(\gamma - \varepsilon)} \right) \frac{\sin \varepsilon}{NV_k} \leq [P_{c.max}^p]; \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^{n_k} m_i |\Delta V| S_k = \left(\sum_{i=1}^{n_k} m_i \sqrt{\left(\frac{dV_k^p}{dt}\right)^2 + g^2 + \frac{Gd_n^4}{8D_n^3 z} \Delta x_c \sin \beta} + \sum_{i=1}^{n_R} p_{0c_i} l_n r_n \sqrt{4f^2 + 0,25\pi^2 \cos(\gamma - \varepsilon)} \right) \frac{1}{NV_k S_k} \leq [\sigma_{n.max}]. \quad (19)$$

Висновки

Наведені детерміновані математичні моделі процесу копіювання головок коренеплодів з умови невивалювання та непошкодження коренеплодів копіром пасивного дообрізчика залишків гички на головках коренеплодів можуть бути використанні в процесі розробки гичкозбиральних машин і оптимізації її конструктивно – технологічних показників.

Література

1. Погорелый Л.В. Свеклоуборочные машины: история, конструкция, теория, прогноз / Л.В. Погорелый, М.В. Татьянко – К. : Феникс, 2004. – 232 с.
2. КД 46.16.01.005 – 93 “Випробування сільськогосподарської техніки. Основні положення”. К.: – 34 с.
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. Топоровский С.А. Обоснование технологического процесса и основных параметров рабочего органа для уборки ботвы сахарной свеклы без копирования головок коренеплодов. Автореф. дисс. канд. техн. наук. – К.: УСХА, 1974. – 19 с.
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. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Емендяев. – М. : Наука, 1981. – 706 с.