

Головач І.В.

Дорогань О.П.

Національний університет
біоресурсів і
природокористування України
м. Київ, Україна
E-mail:nubip1601@gmail.com

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ
ОЧИЩЕННЯ ГОЛОВОК КОРЕНЕПЛОДІВ
ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ ВІД ЗАЛИШКІВ ГИЧКИ

УДК 631.356

В роботі складено диференціальне рівняння руху гнучкої очисної лопаті по верхні головки коренеплоду цукрових буряків. Виходячи з умов створення необхідної сили зчісування та не вибивання з ґрунту коренеплодів буряків, з урахуванням розмірних і масових характеристик коренеплодів цукрових буряків, отримано кінцеві вирази для визначення кута повороту і кутової швидкості обертального руху очисної лопаті, яка встановлена на приводному горизонтальному валу, при різних значеннях її геометричних розмірів і форми: прямокутного паралелепіпеда і прямого кругового циліндра. Отримано також аналітичний вираз для визначення сили зчісування черешків гички зі сферичної поверхні головки коренеплоду цукрових буряків.

Ключові слова: цукрові буряки, коренеплід, гичка, очисник, лопать, еквівалентна схема, диференціальне рівняння, сила зчісування.

Актуальність проблеми. Україна належить до високорозвинутих бурякосіючих країн Європи і світу, а цукор є одним із стратегічних продуктів харчування, отже вітчизняному машинобудуванню потрібно випускати бурякозбиральні машини, які мають відповідати рівню найкращих світових аналогів. Сучасні технології збирання гички з цукрових буряків знаходяться на досить високому рівні, але попри високу продуктивність сучасної гичкозбиральної техніки, недоліки збирання присутні. Це, насамперед, низька якість обрізання головок коренеплодів, втрати гички, її засміченість ґрунтовими домішками тощо. Тому дослідження та удосконалення даної техніки є дуже важливим для розвитку даної галузі сільського господарства.

Після основного обрізання гички цукрових буряків на корені ріжучими органами гичкозбиральних машин на головках коренеплодів, як правило, залишаються останки гички, які значно забруднюють викопані буряки. З метою зменшення вмісту рослинних домішок у купі буряків створені конструкції очисників головок, з яких найбільш поширеними є лопатеві очисники, з приводними горизонтальними валами, робочими органами яких є гумові бичі. За конструктивним виконанням такі очисники можуть бути одновальними або двохвальними. В двохвальному очиснику перший вал обертається проти напрямку поступального руху очисника, а другий, навпаки – за ходом руху очисника. Бичі першого валу наносять удари по головках коренеплодів цукрових буряків, збивають залишки гички з головок коренеплодів. Бичі другого валу, обертаючись назустріч бичам першого валу, остаточно очищують головки коренеплодів від незрізаної гички.

Такий очисник, згідно результатів випробувань, має суттєві недоліки, серед яких основними є: підвищена енергоємність процесу, вибивання тіл коренеплодів буряка з ґрунту, що в подальшому призводить до втрат та зносу еластичних бичів, а це значно ускладнює експлуатацію очисника.

Тому виникає необхідність в дослідженні взаємодії гнучкої очисної лопаті з головкою коренеплоду цукрового буряку на корені, яка дасть можливість шляхом числового моделювання обґрунтувати конструктивні й кінематичні параметри лопатевого очисника.

Аналіз публікацій, присвячених даній проблемі. Питанням видалення залишків гички (незрізаних черешків) з головок коренеплодів цукрових буряків після її основного

зрізу на корені різальними апаратами гичзбиральних машин і очисниками головок присвячено багато наукових праць [1-6, 10] і ін. У них викладено результати теоретичних і експериментальних досліджень очисників головок коренеплодів буряків різних конструкцій: лопатевих [1, 4, 6, 10], кільцевого [5], секторного [7], барабанного [2] типів, а також очисника, виконаного у вигляді параболоїда [3]. Однак найбільшого застосування у світі знайшли очисники головок коренеплодів лопатевого типу через простоту їх конструкцій і забезпечення необхідної якості роботи в порівняно сприятливих умовах (відсутність значної кількості черешків гички – коротких, зелених і сухих, полеглих, міцно зв'язаних з головками). У зазначених вище опублікованих наукових працях представлені різні варіанти теоретичних досліджень взаємодії очисних елементів з головкою коренеплодів буряку. Однак у більшості з зазначених робіт при теоретичному обґрунтуванні їх конструктивних і кінематичних параметрів недостатньо точно й повно враховані створювані ними зусилля зчісування, розмірні характеристики коренеплодів, напрям і модуль робочої швидкості поступального руху очисника, також недостатньо у деяких працях обґрунтована маса еластичних лопатей (бичів) і ін. Незважаючи на те, що технологічні процеси збирання цукрових і кормових буряків багато в чому подібні, збирання гички і її залишків з головок коренеплодів кормових буряків на корені практично не досліджене, у деяких роботах лише частково обґрунтоване і то тільки експериментально [5, 10 – 11].

Наведені в літературі відомості стосуються теоретичних і експериментальних досліджень лише конкретних типів і конструкцій очисників головок коренеплодів від залишків гички з усіма прийнятими їхніми авторами припущеннями і спрощеннями, а тому їх застосування для подальших досліджень нових типів очисників є досить сумнівним.

Таким чином, дотепер у літературі не знайшли відображення дослідження, які б містили універсальні теорії, що могли бути покладені в основу розрахунків і проектування будь-якого типу очисників головок коренеплодів буряків.

Мета дослідження. Підвищення ефективності та якості очищення головок коренеплодів цукрових буряків від залишків гички лопатевим очисником з горизонтальною віссю обертання шляхом теоретичного обґрунтування раціональних параметрів очисника за умов непошкодження коренеплодів та їх не вибивання з ґрунту.

Методичний підхід до проведення досліджень. Теоретичні дослідження взаємодії очисної еластичної лопаті з головкою коренеплодів цукрових буряків проводилися з застосуванням основних положень вищої математики та теоретичної механіки, зокрема теореми про зміну кінетичної енергії механічної системи, теореми про зміну моменту кількості руху механічної системи, теорії удару, складання диференціальних рівнянь руху.

Результати дослідження. Для теоретичного обґрунтування раціональних конструктивних і кінематичних параметрів очисників головок коренеплодів від залишків гички з горизонтальними привідними валами побудуємо найбільш загальну математичну модель взаємодії гнучкої очисної лопаті очисника з головкою коренеплоду буряка, закріпленого в ґрунті.

Для цього, на початку, сформуємо еквівалентну схему роботи найпростішого лопатевого очисника головок коренеплодів буряка, тобто розглянемо тільки процес взаємодії одиничної, еластичної очисної лопаті з головкою коренеплоду буряка, розташованого (закріпленого) у ґрунті, головка якого виступає на деяку висоту над рівнем поверхні ґрунту й містить на своїй твірній незрізані залишки гички (черешки) (рис. 1). Зазначений процес взаємодії еластичної очисної лопаті й головки коренеплоду буряка будемо розглядати у поздовжньо-вертикальній площині.

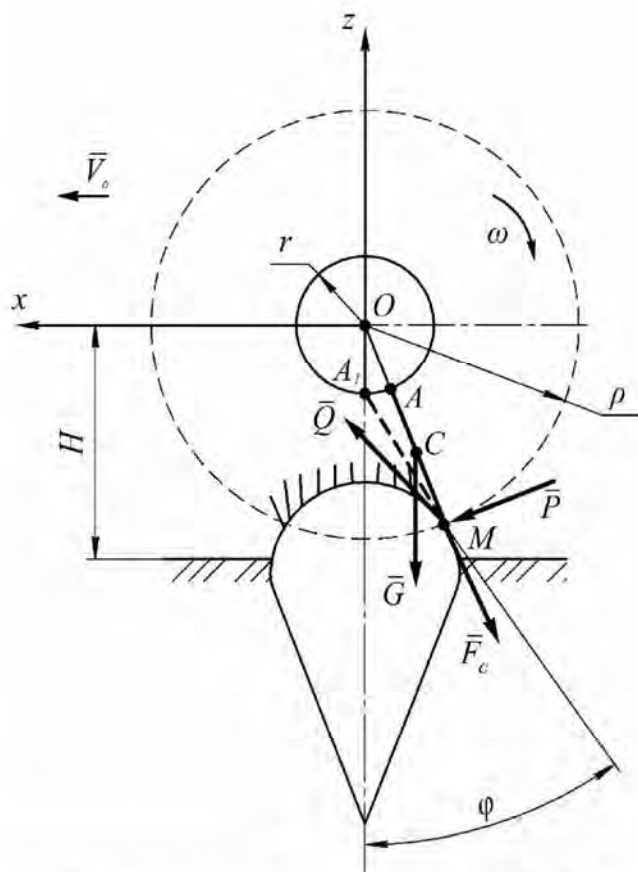


Рис. 1 – Еквівалентна схема взаємодії гнучкої очисної лопаті з головкою коренеплоду буряка

При цьому вісь горизонтального приводного вала (точка O на еквівалентній схемі) очисника перпендикулярна поздовжньо-вертикальній площині, лопать AM шарнірно підвішена на осі A , яка віддалена від центру вала на величину радіуса обертання r . Кінець лопаті описує коло радіусом ρ при обертанні з постійною кутовою швидкістю ω у поздовжньо-вертикальній площині. Вісь приводного горизонтального вала (точка O) рухається над рівнем поверхні ґрунту на постійній висоті H . Вісь обертання O також переміщується поступально з постійною швидкістю руху $\bar{V}_o$. Зв'яжемо з віссю приводного горизонтального вала (точка O) прямокутну декартову систему координат xOz , у якій горизонтальна вісь Ox збігається з напрямком поступального руху очисника, а вісь Oz – спрямована догори. При цьому довжина лопаті дорівнює $2l$. Точка M є точкою удару еластичної лопаті по головці коренеплоду.

Початкова швидкість удару еластичної лопаті по головці коренеплоду буде складатися з відносної швидкості $\bar{V}_r$ бича при його обертальному русі навколо точки O і переносної швидкості $\bar{V}_o$ при поступальному переміщенні точки O . При цьому може бути два можливі варіанти. Перший, коли напрямок обертання лопаті здійснюється за ходом руху очисника (рис. 1), тоді вектори відносної швидкості лопаті $\bar{V}_r$ й переносної швидкості $\bar{V}_o$ додаються, $\bar{V} = \bar{V}_o + \bar{V}_r$. Другий варіант, коли напрям обертання лопаті здійснюється проти ходу руху очисника головок коренеплодів, тоді, при визначенні швидкості удару, зазначені вектори віднімаються, $\bar{V} = \bar{V}_r - \bar{V}_o$.

Покажемо на еквівалентній схемі сили, що діють при взаємодії еластичної очисної лопаті і головки коренеплоду. Вважаємо, що в точці M прикладена сила $\bar{P}$ – сила удару лопаті, спрямована перпендикулярно до самої лопаті AM на самому початку її взаємодії

з головкою коренеплоду буряка. Під час вільного обертання лопаті AM навколо осі (точка O) з кутовою швидкістю ω виникає відцентрова сила $\bar{F}_c$, яка буде рівна $F_c = m\rho\omega^2$ й буде спрямована уздовж лопаті AM . Ця сила ставить лопать на одну пряму з радіусом r і шарніром A . При ударі лопаті об головку коренеплоду буряка, у фазі зустрічі, на лопать також діє сила ваги $\bar{G}$ самої лопаті, яка буде дорівнювати: $G = mg$, зосереджена в центрі мас (точка C) лопаті на відстані $r + l$ від осі обертання і спрямована вертикальної до низу.

При побудові еквівалентної схеми лопатевого очисника нами були прийняті такі припущення:

- 1) очисна лопать AM є однорідною по всій своїй довжині;
- 2) при контакті очисної лопаті з коренеплодом буряка взаємодія сил відбувається тільки в точці M контакту з головкою коренеплоду;
- 3) допустима сила $\bar{P}$ удару очисної лопаті по коренеплоду не перевищує допустиму силу на вибивання (вивертання) коренеплоду буряка із ґрунту, тобто $P \leq [P]$, де $[P]$ – допустима сила на вибивання коренеплоду буряка із ґрунту;
- 4) опір повітря при обертанні лопаті не враховується.

Для подальшого детального аналітичного дослідження технологічний процес очищення головок коренеплодів буряка від залишків гички умовно розділяємо на дві фази:

- 1) фазу зустрічі очисної лопаті з головкою коренеплоду буряка;
- 2) робочу фазу очищення головки коренеплоду буряка від гички.

Оскільки еластична лопать AM рухається поступально разом зі своєю віссю обертання (точка O) зі швидкістю $\bar{V}_o$ й одночасно обертається навколо цієї ж осі з кутовою швидкістю ω , то її кінетична енергія T буде дорівнювати:

$$T = \frac{mV_o^2}{2} + \frac{I_o\omega^2}{2}, \quad (1)$$

де I_o – момент інерції лопаті відносно осі обертання (точка O).

Момент інерції I_o лопаті, згідно теореми Штейнера, буде дорівнювати:

$$I_o = I_c + m(r + l)^2, \quad (2)$$

де I_c – момент інерції лопаті AM відносно осі обертання, що проходить через центр мас (точка C) лопаті, паралельно до осі обертання лопаті; $r + l$ – відстань від центра мас лопаті до її осі обертання.

Підставляючи вираз (2) в (1), одержуємо вираз для обчислення кінетичної енергії лопаті перед початком її ударного контакту з головкою коренеплоду буряка:

$$T = \frac{mV_o^2}{2} + \left[I_c + m(r + l)^2 \right] \frac{\omega^2}{2}. \quad (3)$$

Однак, у момент початку ударного контакту точка A шарнірного підвісу лопаті AM до вала продовжує обертатися навколо осі обертання приводного вала з кутовою швидкістю ω , а точка M контакту кінця лопаті з головкою коренеплоду починає сповільнювати своє обертання в результаті цього ж контакту. Тому лопать починає повертатися у зворотній бік навколо точки A , одночасно прослизуючи нижнім кінцем по поверхні головки коренеплоду, здійснюючи, таким чином, процес зчісування залишків гички з головки коренеплоду буряка.

Очевидно, що до початку ударного контакту з головкою коренеплоду буряка лопать AM перебуває на одній прямій з радіусом r приводного вала, що з'єднує точку O осі

вала з точкою A підвісу лопаті, за довільний проміжок часу t повертаючись на кут ωt , то після контакту з головкою коренеплоду вона починає повертатися вже на кут $\omega t - \varphi$, де φ – кут відхилення лопаті від положення, яке приймала б ця точка при вільному обертанні навколо точки O . Тому в цьому випадку лопать AM буде мати кутову швидкість, що дорівнює $\omega - \dot{\varphi}$, а кінетична енергія T лопаті при цьому буде дорівнювати:

$$T = \frac{mV_o^2}{2} + \left[I_c + m(r+l)^2 \right] \frac{(\omega - \dot{\varphi})^2}{2}. \quad (4)$$

Порівнюючи вирази (3) і (4) бачимо, що частина кінетичної енергії, яка визнається залежністю (3), перетворюється в енергію удару і корисну роботу зчісування гички з головки коренеплоду.

Відомо, що похідна за часом від кінетичної енергії матеріальної системи дорівнює сумі потужностей усіх зовнішніх і внутрішніх сил, прикладених до системи [9]. Зокрема, для абсолютно твердих тіл сума робіт, а значить і потужностей усіх внутрішніх сил дорівнює нулю. Тому, у цьому випадку, умовно вважаючи бічну частину головки коренеплоду абсолютно твердим тілом, одержуємо таку рівність балансу потужності активних сил, що діють на коренеплід буряка при ударному контакті, і витраченої при цьому кінетичної енергії:

$$\frac{dT}{dt} = N, \quad (5)$$

де N – сумарна потужність активних сил, що діють на коренеплід буряка в момент часу t .

Оскільки ділянка контакту лопаті з головкою коренеплоду досить мала у порівнянні з довжиною траєкторії (кола радіуса, що дорівнює $r + 2l$), яку проходить нижній кінець лопаті за один оберт навколо осі обертання, то можна вважати, що на цій ділянці кінець лопаті AM рухається поступально зі швидкістю, що дорівнює $\bar{V} = \bar{V}_o + \bar{V}_r$. Причому, оскільки контакт здійснюється в нижній частині згаданого кола (біля поверхні ґрунту), то в першому наближенні можемо вважати, що вектори $\bar{V}_o$ й $\bar{V}_r$ паралельні, а тому геометричну суму цих векторів можна замінити їх алгебраїчною сумою, тобто $V = V_o + V_r$.

Очевидно, що відносна швидкість $\bar{V}_r$ кінця лопаті AM перед початком ударного контакту за величиною буде дорівнювати $V_r = \omega(r + 2l)$, а в період контакту вона дорівнює $V_r = (\omega - \dot{\varphi})(r + 2l)$, де $r + 2l$ – відстань від точки M контакту до осі O обертання привідного вала.

Таким чином, у першому випадку:

$$V = V_o + \omega(r + 2l), \quad (6)$$

а в другому:

$$V = V_o + (\omega - \dot{\varphi})(r + 2l). \quad (7)$$

Крім цього очевидно, що сила ваги $\bar{G}$ лопаті AM мала в порівнянні з ударною силою $\bar{P}$ на початку контакту лопаті з головкою коренеплоду й мала в порівнянні із силою $\bar{Q}$ зчісування залишків гички з головки коренеплоду в період контакту, а тому в рівнянні балансу потужностей і енергії нею можна знехтувати.

Таким чином, на початку контакту маємо рівність: $N = PV$, або $N = P[V_o + \omega(r + 2l)]$, а в період самого контакту – рівність: $N = P[V_o + (\omega - \dot{\varphi})(r + 2l)]$.

Тоді рівняння (5) балансу потужності ударної сили P і втрат кінетичної енергії під час удару буде мати такий вигляд:

$$\frac{dT}{dt} = P[V_o + \omega(r + 2l)]. \quad (8)$$

Диференціюючи вираз (4) за часом t , отримаємо:

$$\frac{dT}{dt} = [I_c + m(r + l)^2](\omega - \dot{\phi})\ddot{\phi}. \quad (9)$$

Порівнюючи праві частини виразів (8) і (9), будемо мати:

$$[I_c + m(r + l)^2](\omega - \dot{\phi})\ddot{\phi} = P[V_o + \omega(r + 2l)]. \quad (10)$$

Нехай далі, $[P]$ – допустима ударна сила вибивання коренеплоду буряка із ґрунту при ударній взаємодії еластичної лопаті з головкою коренеплоду.

Замінюючи у виразі (10) ударну силу P на допустиму ударну силу $[P]$, одержуємо диференціальне рівняння повороту лопаті навколо точки A за умови невибивання коренеплоду буряка із ґрунту на початку ударного контакту, тобто протягом дуже малого проміжку часу t , точніше, часу ударного контакту. Подальше, післяударне кутове переміщення лопаті буде описуватись наступним диференціальним рівнянням:

$$[I_c + m(r + l)^2](\omega - \dot{\phi})\ddot{\phi} = Q[V_o + (\omega - \dot{\phi})(r + 2l)], \quad (11)$$

де Q – сила зчісування залишків гички з головки коренеплоду буряка.

Диференціальне рівняння (10) можна замінити різницеvim рівнянням, використовуючи теорему про зміну моменту кількості руху механічної системи при ударній взаємодії:

$$I_A \omega_1 - I_A \omega_o = M_A(S), \quad (12)$$

де I_A – момент інерції лопаті відносно точки A ; ω_o – кутова швидкість лопаті відносно точки A до удару; ω_1 – кутова швидкість лопаті відносно точки A після удару; $M_A(S)$ – момент імпульсу ударної сили відносно точки A .

При цьому ударний імпульс S буде дорівнювати:

$$S = \int_0^{\tau} P dt, \quad (13)$$

а момент зазначеного ударного імпульсу буде мати таке значення:

$$M_A(S) = 2l \int_0^{\tau} P dt, \quad (14)$$

де P – сила удару; $2l$ – довжина лопаті; τ – тривалість удару.

Оскільки до ударного контакту лопать не поверталася відносно точки A , тому $\omega_o = 0$.

Тоді з виразів (12) і (14) при $\omega_o = 0$ знаходимо кутову швидкість ω_1 обертання лопаті в кутовому переміщенні відносно точки A після удару:

$$\omega_1 = \frac{2l \int_0^{\tau} P dt}{I_A}. \quad (15)$$

Якщо замінити силу P на силу $[P]$, то одержуємо:

$$\omega_1 = \frac{2l \int_0^{\tau} [P] dt}{I_A}, \quad (16)$$

а, враховуючи, що $[P] = \text{const}$, будемо мати:

$$\omega_1 = \frac{2[P] l \tau}{I_A}, \quad (17)$$

де $I_A = I_c + ml^2$.

Таким чином, визначена кутова швидкість ω_1 обертання лопаті навколо точки A після удару за умови невивбання коренеплоду буряка із ґрунту.

Тому кутова швидкість лопаті в обертальному русі відносно точки O після удару буде дорівнювати $\omega - \omega_1$.

Прийmemo в рівнянні (11), у першому наближенні, що $\dot{\varphi} = \omega_1$. Таке допущення можна зробити через короткочасність контакту лопаті з головкою коренеплоду буряка.

Тоді рівняння (11) значно спроститься й буде мати такий вигляд:

$$\left[I_c + m(r+l)^2 \right] (\omega - \omega_1) \ddot{\varphi} = Q \left[V_o + (\omega - \omega_1) (r+2l) \right]. \quad (18)$$

Звідси знаходимо кутове прискорення $\ddot{\varphi}$ лопаті, яке буде дорівнювати:

$$\ddot{\varphi} = \frac{Q \left[V_o + (\omega - \omega_1) (r+2l) \right]}{\left[I_c + m(r+l)^2 \right] (\omega - \omega_1)}. \quad (19)$$

Після першого інтегрування виразу (19) одержуємо:

$$\dot{\varphi} = \frac{Q \left[V_o + (\omega - \omega_1) (r+2l) \right] t}{\left[I_c + m(r+l)^2 \right] (\omega - \omega_1)} + C_1. \quad (20)$$

Після другого інтегрування виразу (19) одержуємо закон кутового післяударного переміщення лопаті по головці коренеплоду буряка, при якому здійснюється зчісування залишків гички з його головки:

$$\varphi = \frac{Q \left[V_o + (\omega - \omega_1) (r+2l) \right] t^2}{2 \left[I_c + m(r+l)^2 \right] (\omega - \omega_1)} + C_1 t + C_2. \quad (21)$$

Довільні постійні C_1 і C_2 знаходимо з наступних початкових умов: при $t = 0$: $\dot{\varphi} = \omega_1$, $\varphi = 0$.

При цьому одержуємо $C_1 = \omega_1$, $C_2 = 0$.

Тоді вираз (21) прийме наступний вигляд:

$$\varphi = \frac{Q \left[V_o + (\omega - \omega_1) (r+2l) \right] t^2}{2 \left[I_c + m(r+l)^2 \right] (\omega - \omega_1)} + \omega_1 t. \quad (22)$$

Силу Q зчісування залишків гички з головки коренеплоду буряка аналітично визначимо в такий спосіб.

Як відзначено в [10-11], черешок гички в поперечному перерізі, у загальному випадку, близький до трикутної форми, що має при основі западину також трикутної форми (рис. 2).

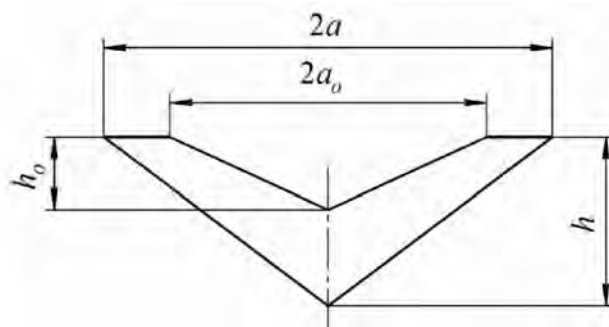


Рис. 2 – Схема поперечного перерізу черешка гички цукрового буряка

Зазначені на рис. 2 розміри використовуємо надалі для розрахунків площі поперечного перерізу черешків гички.

Будемо вважати, що процес зчісування залишків гички відбувається безпосередньо на самій головці коренеплоду в місці виходу черешка з головки, тобто закріплення черешка, за рахунок деформації безпосереднього зсуву самого черешка гички. Очевидно, що процес зчісування буде можливий за такої умови:

$$\frac{Q}{nF} \geq [\tau], \quad (23)$$

де Q – сила зчісування; $[\tau]$ – допустимі дотичні напруження зсуву для черешка гички; F – площа поперечного перерізу одного черешка гички; n – кількість черешків, які одночасно зчісуються зі сферичної поверхні головки коренеплоду буряка.

Обчислимо тепер необхідну для зчісування черешків гички з головки коренеплоду буряка силу Q зчісування. З умови (23) одержуємо:

$$Q \geq nF[\tau]. \quad (24)$$

Як видно з рис. 2, площа поперечного перерізу черешка гички цукрового буряка буде дорівнювати:

$$F = \frac{1}{2} 2ah - \frac{1}{2} 2a_o h_o, \quad (25)$$

або

$$F = ah - a_o h_o. \quad (26)$$

Враховуючи вирази (24) і (26), знаходимо силу Q зчісування. Вона буде дорівнювати:

$$Q \geq (ah - a_o h_o)n[\tau]. \quad (27)$$

У першому наближенні будемо вважати, що одночасно зчісується ряд, що складається з п'яти черешків. Згідно [10-11], черешок має наступні розміри: $a = 5$ мм; $a_o = 2$ мм; $h = 5$ мм; $h_o = 2$ мм. Середнє значення допустимого дотичного напруження $[\tau]$ для матеріалу черешка згідно [10-11] дорівнює: $[\tau] = 1,14 \cdot 10^6$ Па.

Підставляючи значення наведених вище величин у вираз (27) одержуємо:

$$Q \geq (5 \cdot 5 - 2 \cdot 2) \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 1,14 \cdot 10^6 = 119,7 \text{ Н.}$$

Приймаємо далі значення сили зчісування, що дорівнює $Q = 120$ Н.

Задавшись часом t_1 тривалості контакту лопаті з головкою коренеплоду буряка, можна знайти кут повороту φ_1 лопаті навколо точки A за час контакту:

$$\varphi_1 = \frac{Q[V_o + (\omega - \omega_1)(r + 2l)]t_1^2}{2[I_c + m(r + l)^2](\omega - \omega_1)} + \omega_1 t_1. \quad (28)$$

З виразу (28) можемо визначити кутову швидкість ω обертання лопаті навколо точки O , з урахуванням умови не вибивання коренеплоду буряка з ґрунту при здійсненні процесу зчісування залишків гички з головки коренеплоду:

$$\omega = \frac{Q V_o t_1^2}{2[I_c + m(r + l)^2](\varphi_1 - \omega_1 t_1) - Q(r + 2l)t_1^2} + \omega_1. \quad (29)$$

У такий же спосіб можна обчислити й інші параметри еластичної очисної лопаті, наприклад масу m лопаті або її довжину $2l$.

Момент інерції I_c лопаті відносно осі, що проходить через центр мас лопаті (точка C) паралельно осі обертання вала (точка O), залежить від форми поперечного перерізу самої лопаті.

Для лопаті, що має форму прямокутного паралелепіпеда зі сторонами $2a \times 2b \times 2l$ зазначений момент інерції I_c буде дорівнювати [9]:

$$I_c = \frac{m}{3}(a^2 + l^2), \quad (30)$$

де $2a$ – ширина лопаті; $2l$ – довжина лопаті.

Якщо очисна лопать має форму прямого кругового циліндра, то її момент інерції I_c буде дорівнювати [9]:

$$I_c = \frac{m}{4}\left(\frac{4l^2}{3} + r_1^2\right), \quad (31)$$

де r_1 – радіус поперечного перерізу лопаті; $2l$ – довжина лопаті.

Таким чином, у результаті проведеного теоретичного дослідження отримані в кінцевому вигляді аналітичні вирази, які дають можливість безпосередньо визначати конструктивні і кінематичні параметри еластичної очисної лопаті, що забезпечує ефективне зчісування залишків гички з головок коренеплодів.

Висновки:

1. Побудована нова розрахункова математична модель взаємодії еластичної очисної лопаті з головкою коренеплодів цукрових буряків при очищенні їх від залишків гички лопатевим очисником з горизонтальною віссю обертання.

2. Отримані в кінцевому вигляді розв'язки диференціального рівняння руху гнучкої очисної лопаті по головці коренеплоду буряка дали можливість одержати нові аналітичні вирази для визначення кута повороту й кутової швидкості обертального руху очисної лопаті, встановленої на привідному горизонтальному валу, з умов ефективного зчісування залишків гички, при різних значеннях її геометричних розмірів і форми: прямокутного паралелепіпеда і прямого кругового циліндра. Отримано також аналітичний вираз для визначення сили зчісування черешків гички зі сферичної поверхні головки коренеплоду цукрового буряка.

3. Теоретичні дослідження, які дозволяють визначити раціональні конструктивні й кінематичні параметри робочих органів очисників головок коренеплодів від залишків гички, дають змогу не тільки вдосконалити зазначений технологічний процес, але й створити нові більш ефективні зразки очисників.

4. Результати даного теоретичного дослідження можуть бути використані для проведення аналогічних розробок в галузі механізації сільського господарства, зокрема

обмолоту зернових культур, зрізування, дроблення й плющення сільськогосподарських матеріалів і ін.

Література:

1. Погорілий Л.В., Татянянко Н.В., Брей В.В. та інш. Буракозбиральні машини. – Київ: Техніка, 1983. – 168 с.
2. Хелемендик М.М. Підвищення механіко-технологічної ефективності трудомістких процесів в буряківництві: Автореф. дис....д-ра. техн. наук. – Тернопіль: ТПІ, 1996. – 48 с.
3. Погорілий Л.В. Дослідження і розробка технологічного процесу відділення гички від коренеплодів цукрових буряків: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Київ: УСГА, 1964. – 24 с.
4. Мішин М.А. Дослідження та обґрунтування параметрів робочих органів для доочищення головок коренеплодів цукрових буряків від залишків гички: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Москва: ВИСХОМ, 1981. – 23 с.
5. Огуречников Н.А. Пошук, дослідження і обґрунтування технологічного процесу і робочих органів для очищення головок цукрових буряків: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Мінськ: ЦНПМЕСГ, 1977. – 14 с.
6. Мартиненко В.Я. Розробка конструкції і визначення експлуатаційних параметрів очисників головок коренеплодів: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Тернопіль: ТПСІ, 1992. – 25 с.
7. Мартиненко В.Я. Обґрунтування конструктивних параметрів очисників головок коренеплодів. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Проблеми і перспективи створення буракозбиральної техніки": – Вінниця, 1996. – С. 41-44.
8. Гурченко О.П., Савченко Я.В. Механізація збирання гички цукрових буряків. Журнал: Техніка в сільському господарстві. Москва: Урожай, 1986. – № 9. – С. 15-17.
9. Бутенін Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретичної механіки. – Том 2. – Москва: Наука, 1985. – 496 с.
10. Булгаков В.М. Буракозбиральні машини. Монографія. – Київ: Аграрна наука, 2011. – 351 с.
11. Хелемендик М.М. Напрямки і методи розробки нових робочих органів сільськогосподарських машин. Монографія. – Київ: Аграрна наука, 2001. – 280 с.
12. Bulgakov V. Експериментальні дослідження нового робочого органу для доочищення головок коренеплодів цукрових буряків / V. Bulgakov, W. Orechowski, E. Krasowski, Z. Burski // Current problems of agricultural engineering in an aspect of integration of Poland with European Union: Jubilee international scientific conference XXX years of Agricultural Engineering Faculty at Agricultural University of Lublin. – Lublin: WAR, 2000. – P. 399-410.
13. Булгаков В.М. Диференціальні рівняння руху гнучкої очисної лопаті по поверхні головки коренеплоду / В.М. Булгаков, І.В. Головач // Механізація та електрифікація сільського господарства. Міжвідомчий тематичний науковий збірник. – Глеваха, 2002. – Випуск 86. – С. 160-165.
14. Булгаков В.М. Теорія очищення головок коренеплодів на корені гнучкою лопаттю / В.М. Булгаков, І.В. Головач // Науковий вісник Національного аграрного університету. – Київ, 2003. – Випуск 60. – С. 66-86.
15. Lammers S. Defoliation of sugar beets - assessment of quality and gain in delivered beet mass / S. Lammers, P. Olaf, R. Olaf // Landtechnik. – 2010. – №6. – P. 464-467.
16. Линник А.В. Визначення динамічних параметрів жорсткого очищувача при взаємодії з коренеплодом / А.В. Линник // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2014. – Том 73. – № 1. – С. 165-171.

Summary

Golovach I.V., Dorogan O.P. Mathematical model of the process of cleaning the heads of coreneplodes of sugar burjaks from the cutting

The differential equation of motion of a flexible cleaving blade on the surface of sugar beet root crop head is compiled in the paper. Proceeding from the conditions of creation of the necessary force of combing and not knocking out the root of beet root, taking into account the dimensional and mass characteristics of sugar beet root crops, final expressions were obtained for determining the angle of rotation and angular velocity of the rotary motion of the cleaning blade, which is installed on the drive horizontal shaft, at different values its geometric sizes and shapes: a rectangular parallelepiped and a straight circular cylinder. An analytical expression was also obtained for determining the force of combining the petioles of the wedge from the spherical surface of the head of the sugar beet root.

Keywords: sugar beet, root, stem, purifier, blade, equivalent scheme, differential

References

1. Pogoriliy L.V., Tatyanko N.V., Brey V.V. ta insh. Buryakozbiralni mashini. – Kiyiv: Tehnika, 1983. – 168 s.
2. Helemendik M.M. Pidvischennya mehaniko-tehnologichnoyi efektyvnosti trudemistkikh protsesiv v buryakivnitstvi: Avtoref. dis....d-ra. tehn. nauk. – Ternopil: TPI, 1996. – 48 s.
3. Pogoriliy L.V. Doslidzhennya i rozrobka tehnologichnogo protsesu viddilennya gichki vid koreneplovdiv tsukrovih buryakiv: Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. – Kiyiv: US-GA, 1964. – 24 s.
4. Mishin M.A. Doslidzhennya ta obgruntuvannya parametriv robochih organiv dlya do-ochischennya golovok koreneplovdiv tsukrovih buryakiv vid zalishkiv gichki: Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. – Moskva: VISHOM, 1981. – 23 s.
5. Ogurechnikov N.A. Poshuk, doslidzhennya i obgruntuvannya tehnologichnogo protsesu i robochih organiv dlya ochischennya golovok tsukrovih buryakiv: Avtoref. dis kand. tehn. nauk. – Minsk: TsNIIMESG, 1977. – 14 s.
6. Martinenko V.Ya. Rozrobka konstruktsiyi i viznachennya ekspluatatsiynih parametriv ochisnikiv golovok koreneplovdiv: Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. – Ternopil: TPSI, 1992. – 25 s.
7. Martinenko V.Ya. Obgruntuvannya konstruktivnih parametriv ochisnikiv golovok koreneplovdiv. Materiali mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferentsiyi "Problemi i perspektivi stvorennya buryakozbiralnoyi tehniki": – Vinnitsya, 1996. – S. 41-44.
8. Gurchenko O.P., Savchenko Ya.V. Mehanizatsiya zbirannya gichki tsukrovih buryakiv. Zhurnal: Tehnika v silskomu gospodarstvi. Moskva: Urozhay, 1986. – # 9. – S. 15-17.
9. Butenin N.V., Lunts Ya.L., Merkin D.R. Kurs teoretichnoyi mehaniki. – Tom 2. – Moskva: Nauka, 1985. – 496 s.
10. Bulgakov V.M. Buryakozbiralni mashini. Monografiya. – Kiyiv: Agrarna nauka, 2011. – 351 s.
11. Helemendik M.M. Napryamki i metodi rozrobki novih robochih organiv silsko-gospodarskikh mashin. Monografiya. – Kiyiv: Agrarna nauka, 2001. – 280 s.
12. Bulgakov V. Eksperimentalni doslidzhennya novogo robochogo organu dlya doochischennya golovok koreneplovdiv tsukrovih buryakiv / V. Bulgakov, W. Orechiwski, E. Krasowski, Z. Burski // Current problems of agricultural engineering in an aspect of

- inte-gration of Poland with European Union: Jubilee international scientific conference XXX years of Agricultural Engineering Faculty at Agricultural University of Lublin. – Lublin: WAR, 2000. – P. 399-410.
13. Bulgakov V.M. Diferentsialni rivnyannya ruhu gnuchkoyi ochisnoyi lopati po poverhni golovki koreneplođu / V.M. Bulgakov, I.V. Golovach // *Mehanizatsiya ta elektrifikatsiya silskogo gospodarstva. Mizhvidomchiy tematichtnyy naukoviy zbirnik*. – Glevaha, 2002. – Vipusk 86. – S. 160-165.
 14. Bulgakov V.M. Teoriya ochischennya golovok koreneplođiv na koreni gnuchkoyu lopattyu / V.M. Bulgakov, I.V. Golovach // *Naukoviy visnik Natsionalnogo agrarnogo universitetu*. – Kiyiv, 2003. – Vipusk 60. – S. 66-86.
 15. Lammers S. Defoliation of sugar beets - assessment of quality and gain in delivered beet mass / S. Lammers, P. Olaf, R. Olaf // *Landtechnik*. – 2010. – #6. – P. 464-467.
 16. Linnik A.V. Vyznachennya dinamichnih parametriv zhorstkogo ochischuvacha pri vzaemodiyi z koreneplođom / A.V. Linnik // *Visnik Ternopil'skogo natsionalnogo tehniknogo universitetu*. – 2014. – Tom 73. – # 1. – S. 165-171.