

У статті розглядається проблема підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин азотуванням в тліючому розряді.

Ви рішення проблеми підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин зменшує опір різанню при обробці ґрунту, що сприяє зменшенню тягового зусилля агрегату і в кінцевому варіанті економії пального.

Азотування досліджуваних зразків проводились на установці УАТР-1, призначеній для поверхневої модифікації деталей, інструменту та оснащення методом БАТР або аналогічних дифузійних вакуумних процесів.

Встановлено, що при безводневому азотуванні в тліючому розряді (БАТР) відбуваються такі основні взаємоконкуруючі процеси: утворення нітридів, дифузійне насичення поверхні азотом і розпорощення поверхневого шару. Утворення нітридів відбувається при низьких значеннях питомого енергетичного потоку, процес розпорощення поверхні активізується при високих значеннях напруги, а за дифузійю азоту в глибину металу відповідає густина струму.

Структура і фазовий склад азотованих шарів визначається комбінацією режимних і енергетичних параметрів. Можливість керування енергетичними параметрами БАТР дозволяє значно розширити область отримання азотованих шарів із наперед заданими експлуатаційними характеристиками деталей машин і обладнання при одночасному зниженні енергоємності процесу азотування.

Результати досліджень показали що величина зношування азотованого інструменту, в порівнянні з не азотованим зменшилась на 25 – 40 %.

**безводне азотування в тліючому розряді (БАТР), ріжучі органи ґрунтообробних машин (РГМ), робочі та енергетичні параметри БАТР**

*Одержано (Received) 02.10.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 14.10.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023*

**УДК 631.356.22**

**DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.104-116](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.104-116)**

**О.Л. Ляшук**, проф., д-р техн. наук, **Є.Б. Береженко**, канд. техн. наук

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна*

*e-mail: oleglashuk@ukr.net*

**О.В. Козаченко**, проф., д-р техн. наук

*Державний біотехнологічний інститут, м. Харків, Україна*

## **Математична модель переміщення зрізаної гички коренеплодів цикорію в направляючому каналі**

На основі аналізу технологічного процесу зрізування гички коренеплодів Г-подібними ножами роторного гичкоріза розроблено математичну модель, яка функціонально описує переміщення зрізаної гички в направляючому каналі гичкозрізувальної машини залежно від конструктивно-кінематичних параметрів робочих органів різального апарату.

На основі рішення математичної моделі отримано рівняння профілю поверхні кожуха направляючого каналу з умов рівних післяударних швидкостей і рівних швидкостей руху зрізаної гички.

Встановлено, що найбільш прийнятним є профіль, у якого кут зіткнення, або кута між напрямком вектора доударної швидкості та дотичною до профілю направляючого каналу в точці удару дорівнює 25 град., при цьому висота профілю направляючого каналу становить 1,2 м. За значення кута між напрямком вектора доударної швидкості та дотичною до профілю направляючого каналу в точці удару 30...35 град. початкова швидкість руху зрізаної частинки гички знаходиться у діапазоні 9,5...10,5 м/с, а на виході з вихідної горловини – 2,5...3,5 м/с, при цьому час переміщення гички по направляючому каналу становить 0,15...0,2 с.

**коренеплоди цикорію, процес, зрізана гичка, модель, профіль, параметри**

© О.Л. Ляшук, Є.Б. Береженко, О.В. Козаченко, 2023

**Постановка проблеми.** Першим етапом процесу збирання крупних коренеплодів є енерговитратна технологічна операція зрізування основного масиву гички з їх головок, наявний вміст якої у зібраних коренеплодах значно знижує якість сировини та вихід продуктів їх переробки [1, 2].

Одним з напрямків підвищення ефективності процесу збирання гички коренеплодів, який базується на вирішенні комплексної науково-технічної задачі, є пошук нових конструктивних схем робочих органів і створених на їх базі удосконалених енергоощадних гичкозбиральних модулів самохідних бункерних коренезбиральних машин [3, 4], що вирішується шляхом усунення в конструктивно-компонувальній схемі гичкозбирального модуля проміжної ланки або транспортного пристрою, виконаного у вигляді шнекового конвеєра [5, 6].

Це дозволить усунути проміжну операцію переміщення зрізаної гички шнековим конвеєром на зібране поле, яка забезпечується та реалізується внаслідок системного підходу до удосконалення конструктивних особливостей робочих органів шляхом ефективного моделювання та побудови їх компоувальних схем, що утворюють гичкозбиральний модуль транспортної системи самохідної бункерної коренезбиральної машини [7-9]. Крім того, гичка коренеплодів є одним із джерел невитратного виробництва сидератів або добрив, внесення яких шляхом її розкидання на поверхню поля та заробляння у ґрунтове середовище сприяє підвищенню родючості ґрунту [10].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Борис М.М. у праці [11] розробив математичну модель процесу безкопінного зрізування гички коренеплодів, за допомогою якої є можливість розрахувати прогнозовані відходи цукроносної маси (цукрові буряки), або втрати коренеплодів (кормові буряки) та залишки гички на головках коренеплодів з розрахунку одиниці зібраної площі.

Також ним було обґрунтовано, що раціональними параметрами роботи експериментальної гичкозбиральної машини для безкопінного зрізування гички коренеплодів є робоча швидкість машини до 2 м/с та частоти обертання роторного гичкоріза у межах від 700 до 800 об/хв.

Чорновол М.І. і Свирень Н.О. [12] за результатами теоретичного аналізу безкопінного зрізування гички коренеплодів побудували номограму для визначення параметрів ротора гичкоріза.

На основі теоретичного аналізу було встановлено, що практичний радіус роторного гичкоріза знаходиться в межах 0,3...0,35 м.

Мартинов В.М. досліджував вплив висоти зрізування гички на показники якості збирання гички [13]. Також в [14] на основі проведеного аналізу процесу взаємодії ножа роторного гичкоріза з пучком гички ним було встановлено оптимальні співвідношення між основними конструктивними параметрами ножа, а також маси і моменту інерції ножа, що забезпечують якісне безкопінне зрізування гички і головок коренеплодів.

Проте наведені результати відомих теоретично-експериментальних досліджень не в повному обсязі враховують особливості критеріальної оцінки кожного з етапів виконання технологічного процесу зрізування основного масиву гички запропонованими удосконаленими робочими органами гичкозбирального модуля та наступним послідовним переміщення подрібненої гички в направляючому каналі.

Тому виникає потреба в розробленні та дослідженні нових математичних моделей, аналіз яких забезпечать виконання поставленої задачі на основі уточненого дослідження технологічного процесу взаємодії робочих органів гичкозбирального модуля з гичкою та її гарантованого переміщення до фартуха та укладання на поверхню поля.

**Постановка завдання.** Завданням дослідження є розробка аналітичної моделі, яка характеризує процес переміщення зрізаної гички в направляючому каналі гичкозрізувальної машини та обґрунтування його профілю з умов рівних післяударних швидкостей і рівних швидкостей руху зрізаної гички, які забезпечують найбільш сприятливі умови для усунення втрат зрізаної гички на шляху її переміщення від вхідного до вихідного отвору направляючого каналу.

**Викладення основного матеріалу.** Показники якості зрізування гички коренеплодів ножами роторного гичкоріза та енергетичні показники переміщення зрізаної гички в більшості випадків визначаються вибором профілю дугоподібного кожуха, або адекватного профілю направляючого каналу [15].

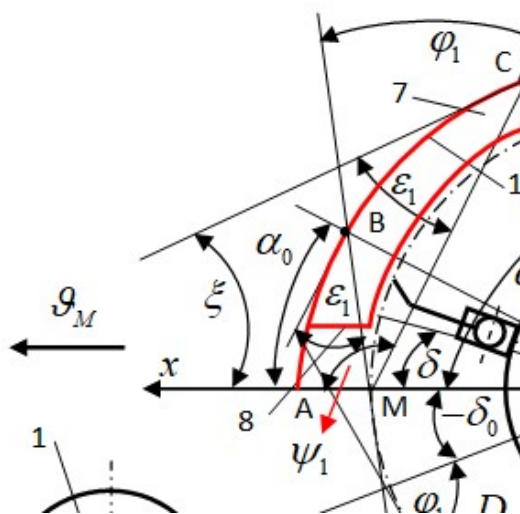
Для математичного моделювання, або вибору профілю кожуха направляючого каналу гичкозбирального модуля розглянемо складену розрахункову схему, яку наведено на рис. 1.

Відомо, що гичка 5 (рис. 1) коренеплодів 6 зрізується ножами 3 роторного гичкоріза 2 на куті його повороту, який близький до кута рівного  $\pi/2$  [16].

Після зрізування, частинки гички за рахунок тиску повітряного потоку, який створений обертанням ножів роторного гичкоріза з кутовою швидкістю  $\omega_n$ , переміщується до вхідної горловини 8 та співударяється з поверхню направляючого кожуха в різних її місцях (точках) по довжині профілю внутрішньої поверхні 10 направляючого каналу 7.

профілю дугоподібного кожуха, або адекватного проф

Для математичного моделювання профілю



1 – опорне колесо; 2 – роторний гичкоріз; 3 – Г-подібний ніж; 4 – барабан ротора; 5 – гичка коренеплодів; 6 – коренеплід; 7 – направляючий канал; 8, 9 – вхідна та вихідна горловина відповідно; 10 – внутрішня бокова поверхня профілю направляючого каналу

Рисунок 1 – Схема до розрахунку профілю направляючого каналу

Джерело: розроблено авторами

Тому необхідно, щоб по всій довжині профілю внутрішньої поверхні направляючого каналу виконувалася умова, яка забезпечує гарантований післяударний рух гички та її вивантаження через вихідний отвір 9 (точка С) направляючого каналу до фартуха (на схемі фартух не показано).

Рівняння профілю направляючого каналу находимо з умови, за якої мінімальна за геометричними розмірами зрізана ножем гичка (або гичка мінімальної маси) сходила з поверхні ножа при повороті роторного гичкоріза на заданий кут повороту, а вся наступна гичка більших геометричних розмірів (або гичка більшої маси) – при повороті роторного гичкоріза на кут повороту більший за заданий на мінімальне значення.

Зрізана ножами ротора гичка з доударною швидкістю польоту  $\mathcal{G}_0$ , співударяючись з поверхнею направляючого каналу, втрачає частину своєї кінетичної енергії згідно з теорією удару та набуває післяударну швидкість руху  $\mathcal{G}_n$ , яка визначається за формулою

$$\mathcal{G}_n = \frac{dL_B}{dt} = \mathcal{G}_0 [\cos \varepsilon_1 - (1 - k_g) f_m \sin \varepsilon_1], \quad (1)$$

де  $L_B$  – переміщення зрізаної частинки гички, м;

$\mathcal{G}_0$  – швидкість польоту зрізаної гички до співудару з поверхнею направляючого каналу, м/с;

$\varepsilon_1$  – кут між напрямком вектора доударної швидкості  $\mathcal{G}_0$  та дотичною до профілю направляючого каналу в точці удару, град.

$k_g$  – коефіцієнт відновлення до ударної швидкості;

$f_m$  – коефіцієнт тертя гички по матеріалу внутрішньої поверхні направляючого каналу.

Приймаючи час удару гички безкінцево малим за якого  $k_g = 0$  з рівняння (1) визначаємо значення кута  $\varepsilon_1$ , за якого можливий рух гички після її співудару з поверхнею направляючого каналу, при цьому

$$\varepsilon_1 \leq (\pi / 2) - \varphi_m, \quad (2)$$

де  $\varphi_m$  – кут тертя гички по матеріалу направляючого каналу, рад.

У разі неоптимального вибору профілю направляючого каналу частина зрізаної ножами роторного гичкоріза гички може, не досягаючи вихідної горловини, розкидатися по поверхні поля у захисну зону рядка коренеплодів. Цей недолік при виконанні умови  $\varepsilon_1 \leq (\pi / 2) - \varphi_m$  усувається шляхом збільшення кутової швидкості  $\omega_n$  ножів і, як наслідок, швидкості  $\mathcal{G}_0$ .

Проте на практиці кутову швидкість  $\omega_n$  ножів встановлюють з умови забезпечення якісного безпідпирного зрізування гички [17, 18]. Будь-яке ж збільшення  $\omega_n$  призводить до зростання споживаної роторним гичкорізом потужності на опір повітря та надання додаткової кінетичної енергії гичці. Тому нормальне збирання гички повинно досягатися не за рахунок збільшення оборотів ножа, а обґрунтуванням профілю направляючого каналу.

Для подальшого аналізу розглянемо процес руху гички масою  $m_c$  по поверхні направляючого каналу (рис. 2.) та визначимо сили, які діють на її частинку. При цьому на частинку гички масою  $m_c$  діють такі сили: сила тяжіння частинки маси гички  $P = m_c g$ , Н; сила тертя гички по внутрішній поверхні направляючого каналу  $F_m$ , Н; сила нормальної реакції  $N_n$ , Н; сила дії повітряного потоку  $F_n$ , Н; сила опору повітряного середовища  $F_c$ , Н.

збільшення оборотів но  
 я подальшого аналі  
 ючого каналу та визна'

Рисунок 2 – Схема сил, які діють на частинку гички під час її руху

Джерело: розроблено авторами

Складемо диференціальні рівняння руху частинки зрізаної гички в формі рівнянь Ейлера для загального випадку:

$$\left. \begin{aligned} m_z \frac{d\mathcal{G}}{dt} &= F_n - F_m - F_c - m_z g \sin \xi; \\ m_z \rho_k \left( \frac{dL_B}{dt} \right)^2 &= N_n + m_z g \cos \xi \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

де  $\mathcal{G}$  – швидкість руху частинки гички, м/с;

$d\mathcal{G}/dt$  – прискорення руху частинки гички, м/с<sup>2</sup>;

$\xi$  – кут між дотичною до профілю направляючого каналу та віссю  $Ox$ , град.;

$\rho_k$  – кривина кривої профілю направляючого каналу.

При цьому:

- кривина кривої  $\rho_k$  профілю направляючого каналу, сила дії повітряного потоку  $F_n$ , сила опору повітряного середовища  $F_c$  визначаються за формулою:

$$\rho_k = \frac{|\ddot{x}\dot{z} - \dot{x}\ddot{z}|}{\sqrt{(\dot{x}^2 + \dot{z}^2)^2}} = \frac{|\ddot{x}\dot{z} - \dot{x}\ddot{z}|}{(\dot{x}^2 + \dot{z}^2)\sqrt{(\dot{x}^2 + \dot{z}^2)}}; \quad (4)$$

$$F_n = 0,5k_o S_z \gamma_n \left( \mathcal{G}_{n,n} - \frac{dL_B}{dt} \right)^2 \sin \left( \mathcal{G}_{n,n} - \frac{dL_B}{dt} \right); \quad (5)$$

$$F_c = 0,5k_o S_z \gamma_n \left( \frac{dL_B}{dt} \right)^2, \quad (6)$$

де  $k_o$  – коефіцієнт аеродинамічного опору;

$S_z$  – площа перерізу Міделя, або площа січення гички, м<sup>2</sup>;

$\gamma_n$  – щільність повітря, кг/м<sup>3</sup>;

$\mathcal{G}_{n,n}$  – швидкість повітряного потоку, м/с;

Приймаємо умову, що дія сили повітряного потоку  $F_n$  направлена в сторону переміщення частинки гички, тобто  $F_n$  є позитивною силою.

Тоді з врахуванням швидкості витання частинки  $\mathcal{G}_g$  (м/с), яка визначається за формулою  $\mathcal{G}_g = \sqrt{2m_z g / k_o S_z}$  [16] залежність (5) набуде вигляду

$$F_n = m_z g \left( \mathcal{G}_{n,n} - \frac{dL_B}{dt} \right)^2 \sin \left( \mathcal{G}_{n,n} - \frac{dL_B}{dt} \right) / \mathcal{G}_g^2, \quad (7)$$

або

$$F_n = \frac{k_o S_z}{2} \left( \vartheta_{n,n} - \frac{dL_B}{dt} \right)^2 \operatorname{sign} \left( \vartheta_{n,n} - \frac{dL_B}{dt} \right). \quad (7^*)$$

Силу нормальної реакції  $N_n$  визначимо з другого рівняння системи (3), враховуючи, що  $F_m = f_m N_n$ . При цьому отримаємо:

$$N_n = m_z k_o \left( \frac{dL_B}{dt} \right)^2 - m_z g \cos \xi; \quad (8)$$

$$F_m = m_z f_m \left( k_o \left( \frac{dL_B}{dt} \right)^2 - g \cos \xi \right). \quad (9)$$

Тоді підставивши (7) – (9) у першу залежність системи (3), після перетворення та спрощення, отримаємо диференціальне рівняння руху частинки гички, зрізаної Г-подібними ножами роторного гичкоріза у направляючому каналі

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{k_o S_z \gamma_n}{2m_z} g (\vartheta_{n,n} - 2\vartheta_{n,n} \vartheta) \operatorname{sign} (\vartheta_{n,n} - \vartheta) - f_m \left[ k_o \vartheta^2 - g \left( \cos \xi - \frac{\sin \xi}{f_m} \right) \right]. \quad (10)$$

Розроблене диференціальне рівняння (10) є вихідним положенням для подальшої розробки профілю внутрішньої поверхні направляючого каналу.

Відомо, що залежно від умов і характеру впливу частинок матеріалу на поверхню дотику та їх руху можуть бути змодельовані види поверхонь, по яких транспортується матеріал: рівних післяударних швидкостей; рівних швидкостей руху матеріалу; постійної кривизни; рівного тиску; вільного польоту матеріалу, рівноуповільнених швидкостей.

У нашому випадку для переміщення зрізаної і подрібненої гички 5 (рис. 1) коренеплодів 6 по внутрішній боковій поверхні 10 у задану точку С, або вивантаження гички через вихідну горловину 9 направляючого каналу 7 найбільш прийнятним є профіль поверхні направляючого каналу за принципом рівних післяударних швидкостей і рівних швидкостей руху зрізаної гички.

На першому етапі розглянемо розробку профілю направляючого каналу за принципом рівних післяударних швидкостей.

Приймаємо умову руху зрізаної гички згідно з (1) та те, що гичка 5 (рис. 1) коренеплодів 6 зрізується ножами 3 роторного гичкоріза 2 на куті його повороту, який близький до кута рівного  $\pi/2$ . При цьому зрізана гичка має різну довжину різання та під час свого переміщення до вихідної горловини співударяється з поверхнею направляючого каналу в різних точках, які належать площині його профілю по всій довжині.

Рівняння профілю направляючого каналу за принципом рівних післяударних швидкостей визначимо із умови, за якої кут профілю  $\varepsilon_1$  (рис. 1) є постійним по всій довжині профілю та менший за граничний.

Згідно з рис. 1 маємо такі співвідношення:

$$\begin{cases} \psi_1 = \pi - \varepsilon_1 - \xi = \varphi_1 + \delta; \\ x = 0,5D_p \cos \delta + \frac{z - 0,5d_\sigma + l_n}{\operatorname{tg}(\varphi_1 + \delta)}; \\ \operatorname{tg} \xi = -dz / dx; \quad dz / dx = \operatorname{tg}(\varepsilon_1 + \varphi_1 + \delta) \end{cases}, \quad (11)$$

де  $\varphi_1$  – кут між напрямком вильоту гички з Г-подібного ножа та діаметром

роторного гичкоріза  $D_p$ , град.;

$\delta$  – кут повороту Г-подібного ножа, або ротора гичкоріза, град.;

$d_\delta$  – діаметр барабана роторного гичкоріза, м;

$l_n$  – довжина Г-подібного ножа, м.

Запишемо диференціальне рівняння (2.34) у полярних координатах, при цьому

$$x = \rho_c \cos \alpha; \quad z = \rho_c \sin \alpha, \quad (12)$$

де  $\rho_c = OC$  – радіус-вектор точки  $C$ , м;

$\alpha$  – кут між радіусом-вектором точки  $C$  та віссю  $Ox$ , град.

Тоді, враховуючи (12) друга рівність (11) після перетворення матиме вигляд

$$\varphi_1 + \delta = \alpha + \arcsin\left(\frac{(d_\delta + l_n) \sin \varphi_1}{2\rho_c}\right), \quad (13)$$

а третє диференціальне рівняння системи (11) із врахуванням отриманої залежності (13) та після проведення математичного перетворення і спрощення запишеться у вигляді

$$\frac{dz}{dx} = \left(1 + \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_c}{d\alpha} \operatorname{tg} \alpha\right) / \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_c}{d\alpha} \operatorname{tg} \alpha, \quad (14)$$

або

$$d\alpha = \frac{\left[ (0,5d_\delta + l_n) \sin \varphi_1 + \operatorname{tg} \varepsilon_1 \sqrt{\rho_c^2 - (0,5d_\delta + l_n)^2 \sin^2 \varphi_1} \right] d\rho_c}{\rho_c \sqrt{\rho_c^2 - (0,5d_\delta + l_n)^2 \sin^2 \varphi_1} - (0,5d_\delta + l_n) \sin \varphi_1 \operatorname{tg} \varepsilon_1}. \quad (15)$$

Після інтегрування лівої частини (15) від  $\alpha_0$  до  $\alpha$ , а правої частини від  $MC = \rho_{c0}$  до  $\rho_c$ , отримаємо рівняння профілю кривини поверхні направляючого каналу в полярних координатах

$$\alpha = \alpha_0 + \operatorname{tg} \varepsilon_1 \ln \left| \frac{\sqrt{\rho_c^2 - \Theta^2} - \Theta \operatorname{tg} \varepsilon_1}{\sqrt{\rho_{c0}^2 - \Theta^2} - \Theta} \right| + \arccos \frac{\Theta}{\rho_c} - \arccos \frac{\Theta}{\rho_{c0}}, \quad (16)$$

де  $(0,5d_\delta + l_n) \sin \varphi_1 = \Theta$ .

У рівнянні (16) невизначеним є лише кут профілю поверхні  $\varepsilon_1$  направляючого каналу. Цей кут  $\varepsilon_1$  регламентує положення за якого частинки зрізаної гички масою  $m_c$ , які знаходяться в найгіршому стані при надходженні до внутрішньої поверхні направляючого каналу, як до поверхні вхідної горловини з параметрами  $\rho_{c0}$ ,  $\alpha_0$ , так і до поверхні вихідної горловини з параметрами  $\rho_c$ ,  $\alpha$  завжди мали умову, за якої  $\mathcal{G} > 0$  та  $N_n > 0$ .

Визначення кута профілю поверхні  $\varepsilon_1$  направляючого каналу проведемо наступним чином. Запишемо рівняння (10) прискорення руху частинки зрізаної гички масою  $m_c$  у полярних координатах

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \rho_c}{dt^2} = & \left( \frac{d\rho_c}{dt} \right)^2 \frac{\Theta \left( \Theta + \operatorname{tg} \varepsilon_1 \sqrt{\rho_c^2 - \Theta^2} - f_m \rho_c^2 \operatorname{tg} \varepsilon_1 \right)}{\rho_c \sqrt{\rho_{c0}^2 - \Theta^2} \left( \sqrt{\rho_{c0}^2 - \Theta^2} - \Theta \operatorname{tg} \varepsilon_1 \right)} - \frac{g}{\rho_c \left( \sqrt{\rho_{c0}^2 - \Theta^2} - \Theta \operatorname{tg} \varepsilon_1 \right)} \times \\ & \times \left[ \left( \sqrt{\rho_{c0}^2 - \Theta^2} - \Theta \operatorname{tg} \varepsilon_1 \right) (\sin \alpha + f \cos \alpha) - \left( \Theta + \operatorname{tg} \varepsilon_1 \sqrt{\rho_{c0}^2 - \Theta^2} \right) (\sin \alpha - \cos \alpha) \right] \end{aligned} \quad (17)$$

Необхідно зазначити, що кут  $\alpha$ , або кут між радіусом-вектором точки  $C$  та віссю  $Ox$  визначається із рівняння (16).

При цьому початковими вихідними умовами є

$$\left. \begin{aligned} \rho_{c0} &= R_p + b_k + \Delta_{min}; \quad \alpha_0 = \varphi_1 + \delta_0 \arcsin(\Theta / \rho_{c0}); \\ \delta_0 &\leq 0; \quad \dot{\rho}_{co} = \mathcal{G}_n \left[ (\rho_c^2 - \Theta^2 - \Theta \operatorname{tg} \varepsilon_1) / \rho_{co} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varepsilon_1} \right] (\cos \varepsilon_1 - f_m \sin \varepsilon_1) \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

де  $b_k$  – найбільша ширина направляючого каналу, м;

$\Delta_{min}$  – мінімально допустимий зазор між зовнішньою поверхнею направляючого каналу та твірною роторного гичкоріза, м;

$\delta_0$  – кут повороту барабана роторного гичкоріза за якого відбувається сходження зрізаної гички з  $\Gamma$ -подібного ножа, град.

На другому етапі розглянемо обґрунтування форми профілю направляючого каналу за принципом рівних швидкостей руху зрізаної і подрібненої гички 5 (рис. 1) коренеплодів 6, яка переміщується по внутрішній частині 10 направляючого каналу 7 та післяударної швидкості частинки зрізаної гички в будь-якій точці  $C$ , яка належить профілю кривої довжиною  $AC$ .

Згідно з (1) та прийнятої умови, що коефіцієнт відновлення доударної швидкості дорівнює нулю, або  $k_g = 0$ , післяударна швидкість руху частинки зрізаної гички коренеплодів для абсолютно непружного тіла буде визначатися за формулою

$$\mathcal{G}_n = \mathcal{G}_n (\cos \varepsilon_1 - f_m \sin \varepsilon_1), \quad (19)$$

де  $\mathcal{G}_n$  – колова швидкість руху  $\Gamma$ -подібного ножа, за якої відбувається сходження зрізаної частинки гички з його ріжучої поверхні, м/с.

Запишемо в (1) значення післяударної швидкості  $\mathcal{G}_n$  частинки зрізаної гички в будь-якій точці  $C$ , яка належить профілю кривої довжиною  $AC$  та її першої похідної  $d\mathcal{G}_n / dt$ , які визначимо з залежності (19).

При цьому маємо такі співвідношення:

$$\sin \xi = \frac{-\frac{dz}{dt}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}}; \quad \cos \xi = \left( \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \right)^{-1}; \quad k_g = \sqrt[3]{1 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}; \quad \frac{d\mathcal{G}_n}{dt} = \frac{-\mathcal{G}(d\mathcal{G})}{\sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} dx} \leq 0. \quad (20)$$

Визначимо в (20) значення  $z'$ , або швидкість переміщення частинки зрізаної гички відносно осі  $Oz$  та другої похідної  $z''$ , або прискорення руху частинки гички відносно осі  $Oz$

$$z' = \frac{dz}{dx}; \quad z'' = \frac{d^2z}{dx^2}. \quad (21)$$

Враховуючи (17) і (20), (21) та після перетворення і спрощення залежності, отримаємо диференціальне рівняння профілю направляючого каналу, який встановлено за принципом рівних швидкостей

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{-\sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \left[ g \left( f_m + \frac{dz}{dt} \right) + \mathcal{G} \left( \sqrt{(x^2 + z^2) - (0,5D_p \sin \varphi_1)^2} \eta + 0,5D_p \sin \varphi_1 \lambda \right) \mu \right]}{(x^2 + z^2) \sqrt{(x^2 + z^2) - (0,5D_p \sin \varphi_1)^2} [\mathcal{G}(f_m \mathcal{G} + \mu)]}, \quad (22)$$

де  $\eta = z - x \frac{dz}{dt}$ ;  $\lambda = x + z \frac{dz}{dt}$ ;



$$\mu = \frac{\mathcal{G}_n \left[ \begin{array}{l} f_m \left( \sqrt{(x^2 + z^2) - (0,5D_p \sin \varphi_1)^2} \left( x + z \frac{dz}{dt} \right) - \right. \\ \left. -0,5D_p \sin \varphi_1 \eta \right) \\ - \left( \sqrt{(x^2 + z^2) - (0,5D_p \sin \varphi_1)^2} \left( z - x \frac{dz}{dt} \right) + 0,5D_p \sin \varphi_1 \left( x + z \frac{dz}{dt} \right) \right) \end{array} \right]}{\sqrt{1 + \left( \frac{dz}{dt} \right)^2 (x^2 + z^2)}};$$

$$\mathcal{G} = \frac{\mathcal{G}_n \left[ \begin{array}{l} f_m \left( \sqrt{(x^2 + z^2) - (0,5D_p \sin \varphi_1)^2} \left( x + z \frac{dz}{dt} \right) - \right. \\ \left. -0,5D_p \sin \varphi_1 \eta \right) \\ + \left( \sqrt{(x^2 + z^2) - (0,5D_p \sin \varphi_1)^2} \left( z - x \frac{dz}{dt} \right) + 0,5D_p \sin \varphi_1 \left( x + z \frac{dz}{dt} \right) \right) \end{array} \right]}{\sqrt{1 + \left( \frac{dz}{dt} \right)^2 (x^2 + z^2)}}.$$

Отримане диференціальне рівняння (22) буде забезпечувати рівність післяударної швидкості та швидкості руху частинки зрізаної гички масою  $m_c$  в будь-якій точці профілю внутрішньої поверхні направляючого кожуха незалежно від того, у якій точці частинки гички співударялися з цією поверхнею.

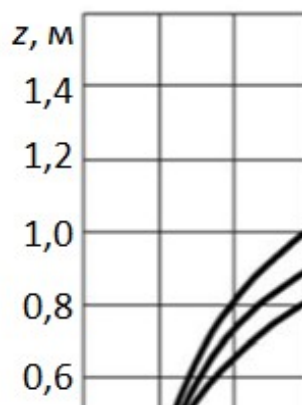
Диференціальне рівняння (17) профілю направляючого каналу вирішується за початкових умов (18). При цьому в диференціальному рівнянні (17) необхідно визначити раціональний кут  $\varepsilon_{1paц.}$  за якого забезпечується переміщення зрізаної частинки гички по внутрішній боковій поверхні профілю направляючого каналу до його вихідної горловини в точку  $C$ .

Диференціальне рівняння (22) вирішується за початкових умов  $x_0$ ,  $z_0$  і  $dz_0/dt$  та дотримання на кожному кроці інтегрування умови  $N_n = m_c k_o (dL_B/dt)^2 - m_c g \cos \xi$ , за якої  $N_n \geq 0$ , або безвідривного руху частинок гички по поверхні профілю направляючого каналу.

Шляхом підстановки конструктивних і кінематичних параметрів роторного гичкоріза в розроблені диференціальні рівняння (17) і (22) та їх рішення методом Рунге-Куты за допомогою програмного забезпечення було визначено кутові параметри профілю направляючого каналу.

У результаті рішення диференціальних рівнянь профілю направляючого каналу було встановлено, що за вхідних даних параметрів роторного гичкоріза, а саме діаметра роторного гичкоріза  $D_p = 0,35 \dots 0,4$  м, частоти обертання роторного гичкоріза  $\omega = 62,8$  рад/с (колова швидкість руху Г-подібного ножа  $\mathcal{G}_n = 11,0 \dots 12,6$  м/с),  $\Delta_{min} = 0,045$  м, коефіцієнта тертя  $f_m = 0,95$ , кута  $\varphi_1 = 85$  град, або кута між напрямком вильоту зрізаної гички з Г-подібного ножа та біжучим радіусом роторного гичкоріза  $R_p$ , кута повороту Г-подібного ножа, або роторного гичкоріза ( $-\delta_0 = 8$  град.), раціональний кут між напрямком вектора доударної швидкості  $\mathcal{G}_0$  та дотичною до профілю направляючого каналу в точці удару знаходиться в діапазоні  $\varepsilon_{1paц.} = 30 \dots 35$  град.

На рис. 3 наведено графічне відтворення залежності зміни дальності вертикального переміщення гички в направляючому каналі від зміни абсциси  $Ox$ , при цьому можна констатувати, що:



1, 2, 3 – відповідно, кут зіткнення  $\varepsilon_{10} = 35^\circ, 25^\circ$  і  $15^\circ$

Рисунок 4 – Залежність зміни висоти транспортування зрізаної гички від абсциси  $x$

Джерело: розроблено авторами

- мінімальна висота профілю  $z_1 \leq 1$  м направляючого каналу досягається за кута зіткнення  $\varepsilon_{10} = 35$  град., крива 1. Але згідно конструктивних особливостей і габаритних розмірів модулів для викопування коренеплодів їх габаритна висота завжди більше 1 м, тобто за такого профілю виникатимуть проблеми конструктивного характеру при проектуванні коренезбиральної техніки;

- профіль, у якого кут зіткнення  $\varepsilon_{10} = 15$  град. (крива 3) призводить до значного збільшення матеріаломісткості направляючого каналу та збільшення кутової швидкості  $\omega$  роторного гичкоріза, або збільшення енергозатрат процесу;

- найбільш прийнятним є профіль, у якого кут зіткнення  $\varepsilon_{10} = 25$  град. (крива 2), при цьому висота профілю направляючого каналу становить 1,2 м, яка є достатньою для вільного розміщення за роторним гичкорізом робочих органів наступного модуля для викопування коренеплодів.

**Висновки.** Розроблені диференціальні рівняння з визначення профілю направляючого каналу дозволяють на аналітичному рівні оптимізувати основні параметри роторного гичкоріза та розмірні параметри розміщення конструктивних елементів гичкозбирального модуля в просторі компоувальної схеми коренезбиральної машини.

За значення кута  $\varepsilon_{1\text{рац.}} = 30\dots35$  град. початкова швидкість руху  $\mathcal{G}_0$  зрізаної частинки гички знаходиться у діапазоні  $\mathcal{G}_0 = 9,5\dots10,5$  м/с, а на виході з вихідної горловини  $\mathcal{G}_c = 2,5\dots3,5$  м/с, при цьому час переміщення гички по направляючому каналу становить  $0,15\dots0,2$  с.

За значення кута  $\varepsilon_1$  більше ніж  $30\dots35$  град. зрізана частинка гички буде відриватися від поверхні направляючого каналу перш ніж переміститися до точки С. При цьому можливий випадок коли частинка гички не буде досягати свого переміщення до вихідної горловини направляючого каналу.

## Список літератури

1. Барановський В. М., Береженко Є. Б., Паньків М. Р., Береженко Б. М., Бойко В. А. Технологічні аспекти процесів роботи гичкозбиральних модулів : монографія. Тернопіль : Редакційно-видавничий відділ Тернопільського національного технічного університету імені Івага Пулюя, 2022. 294 с.
2. Boyko Volodymyr. Mathematical model of the process of contact interaction of the copier with the head of the chicory root crop. *Scientific Journal of the TNTU*. Tern.:TNTU, 2023. Vol. 111. No 3. С. 115–125.
3. Віктор Барановський, Галина Герасимчук, Наталя Дубчак, Євген Береженко, Володимир Бойко. Експериментальні дослідження агробіологічних характеристик коренеплодів. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2020. № 24. С 13–21.
4. Барановський В. М. Основи розробки адаптованих транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин : монографія / В. М. Барановський, М. І. Підгурський, М. Р. Паньків, В. В. Теслюк, В. Б. Онищенко. Видавництво Тернопільського національного технічного університету. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2014. 351 с.
5. Гурченко О. П., Барановський В. М. Результати випробування модернізованої коренезбиральної машини МКК-6А. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 1995. Вип. 81. С. 57–60.
6. Барановський В. М. Транспортно-технологічні системи очисних робочих органів адаптованої коренезбиральної машини. *Сільськогосподарські машини*. 2013. С. 18–29.
7. Рамш В. Ю. Аналіз тенденцій розвитку робочих органів для сепарації вороху коренеплодів / В. Ю. Рамш, В. М. Барановський, М. Р. Паньків, Г. А. Герасимчук. *Наукові нотатки*. 2011. № 31. С. 298–305.
8. Сміль М. В., Герасимчук О. О., Барановський В. М. Математичні моделі процесу копіювання головок коренеплодів копіром пасивного дообрізника залишків гички. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2012. Том 1. № 11. С. 206–212.
9. Войтюк Д. Г. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку : підручник; за ред. Д. Г. Войтюка / Д. Г. Войтюк, В. М. Барановський, В. М. Булгаков та ін. К.: Вища освіта, 2005. 464 с.
10. Барановський В. М. Результати теоретично-експериментальних досліджень секундної подачі вороху коренеплодів. *Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2008. Том 1. С. 111–118.
11. Борис М.М. Обґрунтування конструктивної схеми машини для відокремлення гички цукрових буряків. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2012. № 11. Т. 1(65). С. 98–102.
12. Булгаков В.М., Черновол М.И., Свирень Н.А. Теория свеклоуборочных машин : монография. Кировоград: "КОД", 2009. 256 с.
13. Мартынов В.М. Разработка устройства для уборки ботвы кормовой свеклы : дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук : 05.20.11 . Харьков, 1989. 202 с.
14. Volodymyr Boyko. The results of the study of the cutter of the remains of root crops haulm / Boyko Volodymyr, Viktor Baranovsky, Vitalii Pankiv, Volodymyr Onyshchenko, Sergey Marinenko. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. 2023, № 1 (109). P. 99–109.
15. Барановський В.М., Виговський А.Ю., Сторожук І.М., Паньків В.Р. Розрахунок параметрів робочих органів гичкозбиральних машин : монографія. К.: Компринт, 2015. 242 с.
16. Experimental research of the module for gathering plant of chicory roots / E. Berezhenko, M. Pankiv, Jan Jobbagy, V. Berezhenko *Scientific Journal of TNTU*. Ternopil, 2021. No. 1 (101). P. 56–67.
17. Baranovsky V., Potapenko M. Theoretical analysis of the technological feed of lifted root crops. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 51. No. 1/2017. P. 29–38.
18. Baranovsky V., Dubchak N., Pankiv M. Experimental research of stripping the leaves from root crops. *Acta Technologica Agriculturae*. 2017. Vol. 20. No. 3.P. 69–73.

## References

1. Baranovskyi, V. M., Berezhenko, Ye. B., Pankiv, M. R., Berezhenko, B. M., Boiko, V. A. (2022). *Tekhnolohichni aspekty protsesiv roboty hychkozbyralnykh moduliv* [Technological aspects of the processes of the work of the ginseng harvesting modules]. Ternopil : Redaktsiino-vydavnychiy viddil Ternopilskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu imeni Ivaha Puliuia [in Ukrainian].

2. Boyko Volodymyr (2023). Mathematical model of the process of contact interaction of the copier with the head of the chicory root crop. *Scientific Journal of the TNTU. Tern.:TNTU, Vol. 111. No 3. P. 115–125* [in English].
3. Viktor Baranovskyi, Halyna Herasymchuk, Natalia Dubchak, Yevhen Berezhenko, Volodymyr Boiko. (2020). Eksperymentalni doslidzhennia ahrobiolohichnykh kharakterystyk koreneplodiv [Experimental studies of agrobiological characteristics of root crops]. *Visnyk Lvivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu: ahroinzhenerni doslidzhennia – Bulletin of the Lviv National Agrarian University: agricultural engineering research, № 24, 13–21.* [in Ukrainian].
4. Baranovskyi, V.M., Pidhurskyi, M.I., Pankiv, M.R., Tesliuk, V.V. & Onyshchenko, V.B. (2014). *Osnovy rozrobky adaptovanykh transportno-tekhnologichnykh system korenezbyralnykh mashyn* [Basics of development of adapted transport and technological systems of root harvesting machines]. Vydavnytstvo Ternopilskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Ternopil: TNTU im. I. Puliuia [in Ukrainian].
5. Hurchenko O.P. & Baranovskyi V.M. (1995). Rezultaty vyprobuvannya modernizovanoi korenezbyralnoi mashyny MKK-6A [Test results of the modernized MKK-6A root harvester]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva – Mechanization and electrification of agriculture . Issue 81, 57–60* [in Ukrainian].
6. Baranovskyi, V.M. (2013). Transportno-tekhnologichni systemy ochysnykh robochykh orhaniv adaptovanoi korenezbyralnoi mashyny [Transport and technological systems of cleaning working bodies of the adapted root harvester]. *Silskohospodarski mashyny – Agricultural machinery, 18–29* [in Ukrainian].
7. Ramsh, V.Yu., Baranovskyi, V.M., Pankiv, M.R., Herasymchuk, H.A. (2011). Analiz tendentsii rozvytku robochykh orhaniv dlia separatsii vorokhu koreneplodiv [Analysis of trends in the development of working organs for the separation of a pile of root crops]. *Naukovi notatky – Scientific notes, № 31, 298–305* [in Ukrainian].
8. Smal, M.V., Herasymchuk, O.O. & Baranovskyi, V.M. (2012). Matematychni modeli protsesu kopiiuvannya holovok koreneplodiv kopirom pasyvnoho doobrizchkyka zalyshkiv hychky [Mathematical models of the process of copying the heads of root crops with the copier of the passive trimmer of the remains of the ghee]. *Zbirnyk naukovykh prats Vinnytskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky – Collection of scientific works of the Vinnytsia National Agrarian University. Series: Technical sciences, Vol.1. № 11, 206–212* [in Ukrainian].
9. Voitiuk, D.H. Baranovskyi, V.M., Bulhakovet, V.M. al. (2005). Silskohospodarski mashyny. Osnovy teorii ta rozrakhunku [Agricultural machinery. Basics of theory and calculation]. D. H. Voitiuka (Eds.). Kyiv: Vyscha osvita [in Ukrainian].
10. Baranovskyi, V.M. (2008). Rezultaty teoretychno-eksperymentalnykh doslidzhen sekundnoi podachi vorokhu koreneplodiv [The results of theoretical and experimental studies of the second supply of a pile of root crops]. *Mekhanizatsiia silskohospodarskoho vyrobnytstva – Mechanization of agricultural production, Vol. 1, 111–118.* [in Ukrainian].
11. Borys, M.M. (2012). Obhruntuvannya konstruktyvnoi skhemy mashyny dlia vidokremlennia hychky tsukrovoykh buriakiv [Rationale of the construction scheme of the machine for separating sugar beet pulp]. *Zbirnyk naukovykh prats Vinnytskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky – Collection of scientific works of the Vinnytsia National Agrarian University. Series: Technical sciences, № 11, Vol. 1(65), 98–102.* [in Ukrainian].
12. Bulgakov, V.M., Chernovol, M.Y. & Svyren, N.A. (2009). *Teoriya sveklouborochnykh mashyn* [Theory of beet harvesting machines]. Kyrovohrad: "KOD", 256 s. [in Ukrainian].
13. Martynov, V.M. (1989). Razrabotka ustroystva dlya uborki botvyi kormovoy sveklyi : dis. na soiskanie uch. stepeni kandidata tehniceskikh nauk [Development of a device for harvesting fodder beet tops]. *Candidate's thesis.* Harkov [in Russian]
14. Volodymyr Boyko, Viktor Baranovsky, Vitalii Pankiv, Volodymyr Onyshchenko, Sergey Marinenko. (2023). The results of the study of the cutter of the remains of root crops haulm. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University, № 1 (109), P. 99–109* [in English].
15. Viktor Baranovsky, Maria Pankiv, Oleksiy Kukhar et al. (2022). Results of the experimental investigations of fodder beets harvesting technologies. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. No 2 (106). P. 16–26* [in English].
16. Berezhenko E., Pankiv M., Jobbagy Jan, Berezhenko B. Experimental research of the module for gathering plant of chicory roots / E. Berezhenko, M. Pankiv, Jan Jobbagy, B. Berezhenko *Scientific Journal of TNTU. Ternopil, 2021. No. 1 (101). P. 56–67.*
17. Baranovsky V., Potapenko M. Theoretical analysis of the technological feed of lifted root crops.

- INMATEH – Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 51. No. 1/2017. P. 29–38.
18. Baranovsky V., Dubchak N., Pankiv M. Experimental research of stripping the leaves from root crops. *Acta Technologica Agriculturae*. 2017. Vol. 20. No. 3.P. 69–73.

**Oleg Lyashuk**, Prof., DSc., **Yevhen Berezhenko**, Phd tech. sci.

*Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu, Ternopil, Ukraine*

**Oleksiy Kozachenko**, Prof., DSc.

*State Biotechnological Institute, Kharkiv, Ukraine*

### **Mathematical Model of the Movement of the Cut end of Chicory Roots in the Guide Channel**

The increase in the production of root crops of chicory, which is a valuable technical crop, is restrained by the low level of mechanization of the main technological processes of their collection. The increased content of vegetable impurities or the remains of ghee in the collected root crops of chicory significantly reduces the quality of the raw material and, accordingly, the output of its processing products.

On the basis of the analysis of the technological process of cutting root vegetables with L-shaped knives of a rotary vegetable cutter, a mathematical model was developed that functionally describes the movement of the cut vegetable in the guide channel of the vegetable cutting machine depending on the structural and kinematic parameters of the working organs of the cutting apparatus.

On the basis of the solution of the mathematical model, the equation of the profile of the surface of the casing of the guide channel was obtained from the conditions of equal post-shock velocities and equal speeds of movement of the cut-off beam.

It was established that the most acceptable is the profile in which the angle of collision, or the angle between the direction of the pre-impact velocity vector and the tangent to the profile of the guide channel at the point of impact is equal to 25 degrees, while the height of the profile of the guide channel is 1.2 m. For the value of the angle between in the direction of the pre-impact velocity vector and tangential to the profile of the guide channel at the point of impact 30...35 degrees. the initial speed of movement of the cut particle of the string is in the range of 9.5...10.5 m/s, and at the exit from the outlet throat – 2.5...3.5 m/s, while the time of moving the string along the guide channel is 0.15 ...0.2 s.

**root vegetables of chicory, process, cut scallion, model, profile, parameters**

*Одержано (Received) 02.09.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 23.09.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023*