



# Механізація, електрифікація

УДК 658.562.2:635.11:633.63

© 2023

## ТЕОРІЯ РУХУ ЗРІЗаної ГИЧКИ БУРЯКУ ЦУКРОВОГО ПО ВНУТРІШНІЙ ПОВЕРХНІ ЗАВАНТАЖУВАЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ ГИЧКОЗБИРАЛЬНОЇ МАШИНИ

В.М. Булгаков<sup>1</sup>, В.В. Адамчук<sup>2</sup>, І.В. Головач<sup>3</sup>,  
Є.І. Ігнат'єв<sup>4</sup>, О.М. Троханяк<sup>5</sup>, І. Белоєв<sup>6</sup>, М.Я. Ружило<sup>7</sup>

<sup>1,2</sup>доктори технічних наук, професори, академіки НААН

<sup>3</sup>доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НААН

<sup>4–6</sup>кандидати технічних наук, доценти

<sup>1, 3, 5, 7</sup>Національний університет біоресурсів і природокористування України

вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна

<sup>1, 3</sup>Національна академія аграрних наук України

вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 9, м. Київ, 01010, Україна

<sup>2</sup>Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва

<sup>1, 3</sup>Національної академії аграрних наук України

вул. Вокзальна, 11, смт Глеваха Фастівського р-ну Київської обл., 08631, Україна

<sup>4</sup>Таврійський державний агротехнологічний університет ім. Дмитра Моторного

вул. Жуковського, 66, м. Запоріжжя, 69600, Україна

<sup>6</sup>Русенський університет «Ангел Кинчев»

вул. Студентська, 5, м. Русе, 7017, Болгарія

e-mail: <sup>1</sup>vbulgakov@meta.ua, <sup>2</sup>vvadamchuk@gmail.com, <sup>3</sup>holovach.iv@gmail.com, <sup>4</sup>yevhen.

ihnatiev@tsatu.edu.ua, <sup>5</sup>klendii\_o@ukr.net, <sup>6</sup>ibeloev@uni-ruse.bg, <sup>7</sup>masha.ruzhilo@ukr.net

ORCID: <sup>1</sup>0000-0003-3445-3721, <sup>2</sup>0000-0003-0358-7946, <sup>3</sup>0000-0003-1387-4789,

<sup>4</sup>0000-0002-1770-8297, <sup>5</sup>0000-0003-0315-1595, <sup>6</sup>0000-0003-2014-1970, <sup>7</sup>0000-0002-8794-3495

Надійшла 18.09.2023

**Мета.** Обґрунтувати раціональні конструктивні параметри та режими роботи розробленої конструкції завантажувального механізму гичкозбиральної машини, скориставшись побудованою з цією метою математичною моделлю руху зрізаної гички буряку цукрового по внутрішній поверхні вивантажувального патрубку після її сходження з лопатевої жбурлялки.

**Методи.** Подані у роботі результати досліджень отримані за допомогою методів моделювання, вищої математики, теоретичної механіки, стандартних і спеціально розроблених комп'ютерних програм, призначених для числових розрахунків математичних моделей, а також методів аналізу графічних залежностей між конструктивними і кінематичними параметрами.

**Результати.** Для обґрунтування раціональних конструктивних параметрів та режимів роботи нової конструкції завантажувального механізму гичкозбиральної машини побудовано математичну модель руху зрізаної

гички буряку цукрового по внутрішній поверхні вивантажувального патрубка після її сходження з лопатевої жбурлялки. Спочатку розглядали рух гички по циліндричній ділянці кожуха, а потім — по його прямолінійній ділянці. Отримані диференціальні рівняння описують рух частинки гички по внутрішній поверхні вивантажувального патрубка в довільний момент часу з урахуванням основних конструктивних, кінематичних і силових параметрів, які впливають на протікання процесу завантаження гички у транспортний засіб, що рухається поряд із гичкозбиральною машиною. Розв’язання отриманих диференціальних рівнянь на ПК дало можливість обґрунтувати раціональні конструктивні та кінематичні параметри завантажувального механізму гичкозбиральної машини. **Висновки.** Складено диференціальні рівняння руху частинки зрізаної гички буряку цукрового по циліндричній та прямолінійній ділянці кожуха завантажувального механізму гичкозбиральної машини. В результаті розв’язання отриманих диференціальних рівнянь визначено закон руху частинки по внутрішній поверхні кожуха та закон зміни швидкості як функцій від часу, а також конструктивних параметрів кожуха та кінематичних режимів повітряного потоку. Числові розрахунки на ПК дали змогу побудувати графіки залежностей дугової координати  $S(t)$  та швидкості  $\dot{S}(t)$  від часу  $t$  у процесі руху частинки  $M$  зрізаної гички по циліндричній ділянці кожуха. Встановлено, що збільшення швидкості  $V_a$  сходження частинки  $M$  гички з кінця лопаті викликає зростання дугової координати  $S(t)$ . У межах зміни швидкості  $V_a$  від  $4 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  до  $8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  значення дугової координати  $S(t)$  за час  $t = 0,06 \text{ с}$  збільшується в 1,54 рази. Встановлено, що зростання швидкості  $V_a$  сходження частинки  $M$  гички з кінця лопаті сприяє інтенсивнішому зменшенню швидкості  $\dot{S}(t)$  з плином часу, тобто крива, що відповідає більшому значенню  $V_a$ , має більший нахил до горизонту. У межах зміни швидкості руху  $V_a$  від  $4 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  до  $8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  нахил кривої зміни швидкості  $\dot{S}(t)$  збільшується приблизно вдвічі.

**Ключові слова:** буряк цукровий, гичка, завантаження, математичне моделювання, диференціальні рівняння, раціональні параметри, графічні залежності.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agroviznyk202311-07>

**Постановка проблеми.** Збирання буряку цукрового є однією з найбільш енергоємних і трудомістких технологічних операцій у його виробництві. Водночас однією з ключових проблем важається видалення гички з головок коренеплодів та її завантаження у транспортний засіб. Оскільки гичка є цінним кормом для худоби [6], а останнім часом і важливою сировиною для виробництва біогазу, то її якісне і максимально повне, тобто з мінімальними втратами, збирання є вельми актуальним завданням у галузі механізації сільськогосподарського виробництва. Для його реалізації треба розробити досконалішу конструкцію завантажувальних механізмів гички після її безкопійного зрізу різальним апаратом гичкозбиральної машини у транспортний засіб, що рухається

поруч. Для обґрунтування раціональних конструктивних та кінематичних параметрів завантажувальних механізмів з метою забезпечення якісного виконання технологічних операцій слід провести глибокі теоретичні та експериментальні дослідження зазначеного процесу.

Фундаментальні теоретичні дослідження процесу завантаження гички на етапі подачі від різального механізму на лопатеву жбурлялку та її переміщення вздовж лопаті до сходження у вивантажувальний патрубок свого часу проводив І.В. Головач [1]. Результати теоретичних досліджень руху частинки матеріалу поверхнями робочих органів сільськогосподарських машин представлені також у працях [2–10]. Методи розрахунку та дослідження перспективних

машин у галузі буряківництва викладено у працях [11–14].

**Мета досліджень** — обґрунтувати раціональні конструктивні параметри та режими роботи розробленої конструкції завантажувального механізму гичкозбиральної машини, скориставшись побудованою з цією метою математичною моделлю руху зрізаної гички буряку цукрового по внутрішній поверхні вивантажувального патрубка після її сходження з лопатевої жбурлялки.

**Методи досліджень.** Подані у роботі результати досліджень отримані за допомогою методів моделювання, вищої математики, теоретичної механіки, стандартних і спеціально розроблених комп'ютерних програм, призначених для числових розрахунків математичних моделей, а також методів аналізу графічних залежностей між конструктивними і кінематичними параметрами.

**Результати досліджень.** Створено нову математичну модель руху частинки гички буряку цукрового після її сходження з лопаті жбурлялки і переміщення по циліндричній ділянці кожуха та його прямолінійній ділянці до вильоту з вивантажувального патрубка гичкозбиральної машини.

Спочатку було складено диференціальне рівняння руху частинки гички по циліндричній ділянці кожуха. Для цього знадобилося побудувати еквівалентну схему переміщення частинки гички із зазначенням усіх сил, що діють на неї. Попередньо на еквівалентній схемі було зображено вивантажувальний патрубок у вигляді циліндричної та прямолінійної ділянок кожуха, по внутрішній поверхні якого переміщується частинка М зрізаної гички після її сходження з лопаті жбурлялки і потрапляння у вивантажувальне вікно (рис. 1).

Положення частинки М у довільний момент часу  $t$  на циліндричній ділянці кожуха зручно описувати кутовою координатою  $\varphi$ , як показано на еквівалентній схемі. Відлік кута  $\varphi$  у цьому випадку слід розпочати від вертикалі ( $\varphi = 0$ , точка В) у бік переміщення частинки М гички. Тут  $\varphi_0$  — кут розташування вивантажувального вікна на циліндричній ділянці кожуха.  $S$  — це дугова координата частинки гички, що переміщується циліндричною ділянкою CD кожуха (див. рис. 1). Очевидно,

що  $\varphi_0$  — кутова координата точки С,  $\varphi = \pi/2$  — кутова координата точки D. Отже, дугова координата частинки М визначається залежністю:

$$S = \varphi \cdot R, \quad (1)$$

де  $R$  — радіус циліндричної ділянки кожуха.

Для опису руху частинки М на ділянці CD було введено натуральну систему координат  $\tau Mn$ , у якій  $\tau$  — дотична до кривої CD у точці М,  $n$  — нормаль до кривої CD у точці М, а CD — частина кола.

На еквівалентній схемі показано усі сили, які діють на частинку М гички під час її руху по циліндричній ділянці CD кожуха, значення яких будуть розраховані в подальшому. Отже, маємо:

- вагу  $G$  частинки гички, яка дорівнює

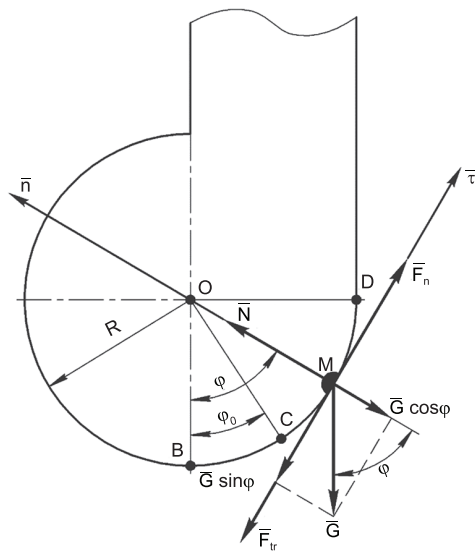
$$G = m \cdot g, \quad (2)$$

де  $m$  — маса частинки;  $g$  — прискорення сили тяжіння;

- нормальну реакцію  $\bar{N}$  внутрішньої поверхні циліндричної ділянки кожуха, значення якої буде визначено нижче;

- силу тертя  $\bar{F}_{tr}$  ковзання частинки М по внутрішній поверхні кожуха, що, як відомо, дорівнює

$$F_{tr} = f \cdot N, \quad (3)$$



**Рис. 1.** Еквівалентна схема процесу руху частинки М зрізаної гички по циліндричній ділянці кожуха

де  $f$  — коефіцієнт тертя ковзання;

• силу  $\vec{F}_n$  тиску повітряного потоку, який створюється лопатями під час обертання жбурлялки, що працює як вентилятор. Ця сила визначається за таким виразом [3]:

$$F_n = k \cdot (V_n - V), \quad (4)$$

де  $V_n$  — швидкість повітряного потоку;  $V$  — швидкість руху частинки  $M$  гички по циліндричній поверхні кожуха;  $k$  — коефіцієнт, що залежить від фізико-механічних властивостей гички.

Відповідно до [4], коефіцієнт  $k$  для повітря дорівнює:

$$k = \frac{a \cdot d \cdot F}{g}, \quad (5)$$

де  $a$  — константа, яка залежить від форми частинки  $M$  та її міделевого перерізу;  $F$  — міделевий переріз;  $d$  — щільність повітря;  $g$  — прискорення сили тяжіння.

Підставивши (5) у (4), отримали:

$$F_n = \frac{a \cdot d \cdot F}{g} \cdot (V_n - V). \quad (6)$$

Враховуючи систему сил, подану на еквівалентній схемі, було записане рівняння руху частинки  $M$  у векторній формі. На підставі основного закону динаміки маємо:

$$m \cdot \vec{a} = \vec{G} + \vec{N} + \vec{F}_{tr} + \vec{F}_n, \quad (7)$$

де  $\vec{a}$  — прискорення частинки  $M$  гички.

Проектуючи векторне рівняння (7) на осі  $M_t$  та  $M_n$  в натуральній системі координат  $M_{tn}$ , отримали таку систему диференціальних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} m \cdot \ddot{S} &= -G \cdot \sin \varphi - F_{tr} + F_n, \\ \frac{m \cdot \dot{S}^2}{R} &= N - G \cdot \cos \varphi, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

де  $\ddot{S}$  — тангенціальне прискорення частинки  $M$  гички;  $\dot{S}$  — швидкість частинки  $M$ , тобто  $V = \dot{S}$ ;  $\frac{\dot{S}^2}{R}$  — нормальне прискорення частинки  $M$ .

З другого рівняння системи (8) можна визначити нормальну реакцію поверхні кожуха:

$$N = m \cdot g \cdot \cos \varphi + \frac{m \cdot \dot{S}^2}{R}. \quad (9)$$

У такому разі сила тертя  $F_{tr}$ , з урахуванням (3) і (9), визначатиметься за виразом:

$$F_{tr} = f \cdot N = f \cdot \left( m \cdot g \cdot \cos \varphi + \frac{m \cdot \dot{S}^2}{R} \right). \quad (10)$$

Враховуючи вирази (4) та (10) і те, що  $V = S$ , перше рівняння системи (8) можна подати у вигляді:

$$\begin{aligned} m \cdot \ddot{S} &= -m \cdot g \cdot \sin \varphi - \\ &- f \cdot \left( m \cdot g \cdot \cos \varphi + \frac{m \cdot \dot{S}^2}{R} \right) + k \cdot (V_n - \dot{S}). \end{aligned} \quad (11)$$

Розділивши обидві частини рівняння (11) на масу  $m$  частинки  $M$ , після низки перетворень отримаємо:

$$\begin{aligned} \ddot{S} + \frac{k}{m} \cdot \dot{S} + \frac{f}{R} \cdot \dot{S}^2 &= \\ &= -g \cdot (\sin \varphi + f \cdot \cos \varphi) + \frac{k}{m} \cdot V_n. \end{aligned} \quad (12)$$

Як впливає з виразу (1),

$$\varphi = \frac{S}{R}. \quad (13)$$

Враховуючи (13), рівняння (12) можна подати у такому вигляді:

$$\begin{aligned} \ddot{S} + \frac{k}{m} \cdot \dot{S} + \frac{f}{R} \cdot \dot{S}^2 &= \\ &= -g \cdot \left( \sin \frac{S}{R} + f \cdot \cos \frac{S}{R} \right) + \frac{k}{m} \cdot V_n. \end{aligned} \quad (14)$$

Початкові умови цієї задачі (при  $t = 0$ ) такі:

$$S(0) = S_0, \quad \dot{S}(0) = V_a, \quad (15)$$

де  $V_a$  — абсолютна швидкість сходження частинки  $M$  гички з лопаті жбурлялки;  $S_0$  — початкове положення частинки  $M$  на циліндричній ділянці кожуха після сходження з лопаті жбурлялки. Причому  $S_0 = \varphi_0 \cdot R$  саме у разі перебування частинки  $M$  у точці  $C$ .

Рівняння (14) розв'язували вздовж дуги  $CD$ , причому інтегрування здійснювали від точки  $C$  з дуговою координатою  $S_0 = \varphi_0 \cdot R$  до точки  $D$  з аналогічною координатою  $S_1 = R \cdot \frac{\pi}{2}$ , тобто до закінчення циліндричної ділянки кожуха і початку прямолінійної ділянки.

Диференціальне рівняння (14) завідомо є нелінійним, тож розв'язати його можна лише числовими методами за допомогою ПК. У результаті будуть побудовані графічні залежності  $S = S(t)$  та  $\dot{S} = \dot{S}(t)$ , причому значення  $S = S_1$  та  $\dot{S} = \dot{S}_1$  можна визначити

у певний час  $t_1$ , що відповідатиме моменту переходу частинки М гички на прямолінійну ділянку кожуха. Швидкість  $V_1 = \dot{S}_1(t_1)$  — це початкова швидкість руху частинки М на прямолінійній ділянці кожуха.

Щоб скласти диференціальне рівняння руху частинки М гички на прямолінійній ділянці кожуха, було побудовано другу еквівалентну схему (рис. 2).

Для опису руху частинки М гички на прямолінійній ділянці DL використали одновимірну систему координат Dx, у якій вісь x спрямована вертикально вгору, в напрямку переміщення частинки гички по внутрішній поверхні прямолінійної ділянки кожуха. Положення частинки М у довільний час t описується значенням поточної координати x. На еквівалентній схемі показано всі сили, що діють на частинку М при її русі ділянкою, що розглядається, і визначено їх значення. Зокрема, на неї діє сила тяжіння  $\bar{G}$ , яка визначається із виразу (2). Однак головною рушійною силою є сила  $\bar{F}_n$  тиску повітряного потоку, що визначається за допомогою виразу (4).

Оскільки частинка М гички під дією відцентрової сили на циліндричній ділянці

кожуха рухається по його стінці DL, яка на цій ділянці спрямована по дотичній до циліндричної ділянки в точці D, то, внаслідок інерційних властивостей маси частинки, вона і далі рухатиметься по стінці кожуха або, в крайньому випадку, на дуже близькій відстані від стінки DL. Отже, гичка рухатиметься тонким шаром по стінці DL без відриву. До того ж на вказаний шар гички в поперечному перерізі кожуха на цій ділянці діятиме повітряний потік, притискаючи його ще сильніше до стінки DL. У підсумку з боку стінки DL виникатиме нормальна реакція  $\bar{N}_1$ , а отже, з'явиться сила тертя  $\bar{F}_{tr1}$ .

Окремі частинки гички за допомогою подавального шнекового транспортера одразу потраплятимуть на вказану поверхню DL. Отже, ця гичка притискатиметься до стінки DL з певним зусиллям, що також викликати-ме появу згадуваної сили тертя.

У першому наближенні нормальну реакцію  $\bar{N}_1$  вважали постійною на всій ділянці переміщення частинки М гички від точки D до точки L, оскільки це переміщення відбувається за досить малий проміжок часу.

Тобто сила тертя:

$$F_{tr1} = f \cdot N_1 = \text{const.} \quad (16)$$

Враховуючи систему сил, подану на еквівалентній схемі (рис. 2), спочатку було записано рівняння руху частинки М гички на ділянці DL у векторній формі:

$$m \cdot \bar{a} = \bar{G} + \bar{F}_n + \bar{F}_{tr1} \quad (17)$$

У проєкції на вісь Dx з урахуванням (2), (4) та (16) рівняння (17) можна подати у такому вигляді:

$$m \cdot \ddot{x} = -m \cdot g + k \cdot (V_n - V) - f \cdot N_1 \quad (18)$$

А з урахуванням того, що  $V = \dot{x}$ , рівняння (18) набуде іншого вигляду:

$$m \cdot \ddot{x} = -m \cdot g + k \cdot (V_n - \dot{x}) - f \cdot N_1 \quad (19)$$

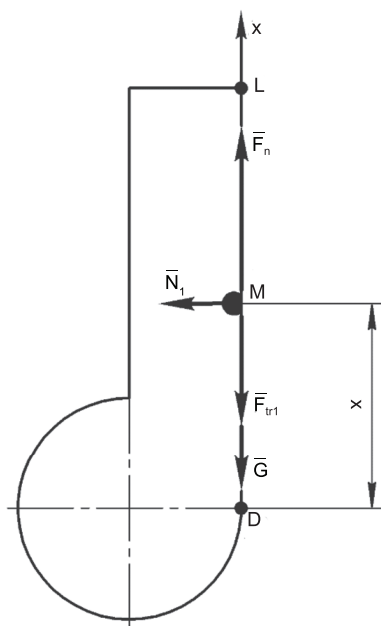
Після низки перетворень отримуємо:

$$\ddot{x} + \frac{k}{m} \cdot \dot{x} = \frac{k}{m} \cdot V_n - g - \frac{f \cdot N_1}{m} \quad (20)$$

Рівняння (20) — це шукане диференціальне рівняння руху частинки М гички вздовж прямолінійної ділянки кожуха. Початковими його умовами (при  $t = 0$ ) є:

$$x(0) = 0; \quad \dot{x}(0) = V_1 \quad (21)$$

Диференціальне рівняння (20) — це лінійне диференціальне рівняння другого порядку



**Рис. 2.** Еквівалентна схема руху частинки М гички по прямолінійній ділянці кожуха завантажувального механізму

з постійними коефіцієнтами з правою частиною, яка є константою. Характеристичне рівняння однорідного рівняння

$$\ddot{x} + \frac{k}{m} \cdot \dot{x} = 0 \quad (22)$$

має такий вигляд:

$$r^2 + \frac{k}{m} \cdot r = 0. \quad (23)$$

Коренями квадратного рівняння (23) є

$$r_1 = 0, r_2 = -\frac{k}{m}.$$

Загальний розв'язок однорідного рівняння (22) можна записати у такому вигляді:

$$\bar{x} = C_1 + C_2 \cdot e^{-\frac{k}{m}t}, \quad (24)$$

де  $C_1, C_2$  — довільні сталі.

Частинний розв'язок неоднорідного рівняння (20) записали з урахуванням вигляду

$$\text{його правої частини: } \left( \frac{k}{m} \cdot V_n - g - f \cdot N_1 \right) \cdot e^{0t}.$$

Оскільки число нуль є коренем характеристичного рівняння (23) і одночасно степенем числа  $e$  у правій частині, то частинний розв'язок можна подати у такому вигляді:

$$x^* = A \cdot t, \quad (25)$$

де  $A$  — константа, яку потрібно визначити.

Методом невизначених коефіцієнтів знаходимо:

$$A = V_n - \frac{m \cdot g + f \cdot N_1}{k}. \quad (26)$$

Отже, частинний розв'язок має такий вигляд:

$$x^* = \left( V_n - \frac{m \cdot g + f \cdot N_1}{k} \right) t, \quad (27)$$

а загальний розв'язок рівняння (20) — такий:

$$x = \bar{x} + x^* = C_1 + C_2 \cdot e^{-\frac{k}{m}t} + \left( V_n - \frac{m \cdot g + f \cdot N_1}{k} \right) t. \quad (28)$$

Довільні сталі  $C_1$  та  $C_2$  знаходимо з початкових умов (21):

$$C_1 = -\frac{m}{k} \cdot (V_n - V_1) + \frac{m^2 \cdot g + f \cdot m \cdot N_1}{k^2}, \quad (29)$$

$$C_2 = \frac{m}{k} \cdot (V_n - V_1) - \frac{m^2 \cdot g + f \cdot m \cdot N_1}{k^2}. \quad (30)$$

Підставляючи (29) і (30) у вираз (28), після низки перетворень маємо:

$$x = \left[ \frac{m}{k} \cdot (V_n - V_1) - \frac{m^2 \cdot g + f \cdot m \cdot N_1}{k^2} \right] \times \\ \times \left( e^{-\frac{k}{m}t} - 1 \right) + \left( V_n - \frac{m \cdot g + f \cdot N_1}{k} \right) t. \quad (31)$$

Вираз (31) описує закон переміщення частинки  $M$  гички прямолінійною ділянкою  $DL$  кожуха завантажувального механізму.

Диференціюючи вираз (31) за часом  $t$ , знаходимо закон зміни відносної швидкості  $\bar{V}$  частинки  $M$  гички під час її руху на прямолінійній ділянці  $DL$ :

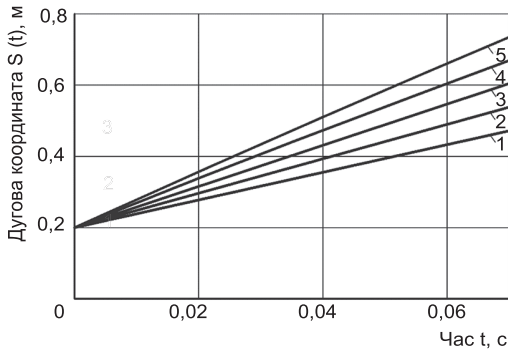
$$\bar{V} = \dot{x} = \left( \frac{m \cdot g + f \cdot N_1}{k} + V_1 - V_n \right) \cdot e^{-\frac{k}{m}t} + \\ + V_n - \frac{m \cdot g + f \cdot N_1}{k}. \quad (32)$$

Підставляючи у вираз (31) замість  $x$  довжину ділянки  $DL$ , за допомогою ПК знаходимо час  $t_2$  переміщення частинки  $M$  гички по ділянці  $DL$  кожуха. Підставляючи значення часу  $t_2$  у вираз (32), за допомогою ПК визначаємо швидкість вильоту частинки  $M$  гички з вивантажувального патрубка. Швидкість  $V_2$  — це початкова швидкість частинки  $M$  гички при теоретичному дослідженні її польоту у транспортний засіб або розкидання по буряковому полю.

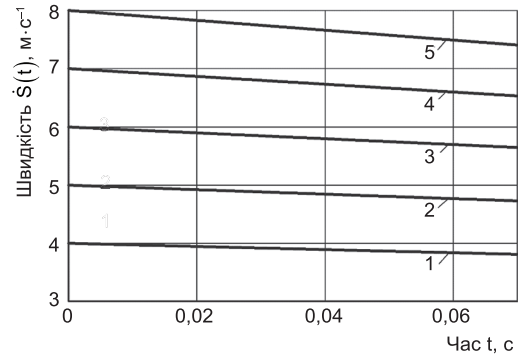
Виконавши числові розрахунки на ПК, отримали графіки залежностей дугової координати  $S(t)$  та швидкості  $\dot{S}(t)$  від часу  $t$  у процесі руху частинки  $M$  зрізаної гички по циліндричній ділянці кожуха завантажувального механізму її сходження з лопаті жбурлялки (рис. 3, 4).

Аналіз поданих на рис. 3 залежностей свідчить про те, що збільшення швидкості  $V_a$  сходження частинки  $M$  гички з кінця лопаті викликає зростання дугової координати  $S(t)$ . У межах зміни швидкості руху  $V_a$  від  $4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  до  $8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  значення дугової координати  $S(t)$  збільшується в 1,54 раза за час  $t = 0,06 \text{ с}$ .

Аналіз графічних залежностей, поданих на рис. 4, свідчить про те, що збільшення швидкості  $V_a$  сходження частинки  $M$  гички з кінця лопаті сприяє інтенсивнішому зменшенню швидкості  $\dot{S}(t)$  з плином часу, тобто крива, що відповідає більшому значенню  $V_a$ , має більший нахил до горизонту. У межах зміни швидкості руху  $V_a$  від  $4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  до  $8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$



**Рис. 3.** Залежність дугової координати  $S(t)$  від часу  $t$  в процесі руху частинки  $M$  зрізаної гички по циліндричній ділянці кожуха завантажувального механізму після її сходження з лопаті жбурлялки зі швидкістю  $V_a = 4 \text{ м·с}^{-1}$  (1); 5 (2); 6 (3); 7 (4); 8  $\text{м·с}^{-1}$  (5)



**Рис. 4.** Залежність швидкості  $\dot{S}(t)$  від часу  $t$  в процесі руху частинки  $M$  зрізаної гички по циліндричній ділянці кожуха завантажувального механізму після її сходження з лопаті жбурлялки зі швидкістю  $V_a = 4 \text{ м·с}^{-1}$  (1); 5 (2); 6 (3); 7 (4); 8  $\text{м·с}^{-1}$  (5)

нахил кривої зміни швидкості  $\dot{S}(t)$  збільшується приблизно вдвічі. Така її поведінка пояснюється тим, що збільшення швидкості  $V_a$  у початковий момент часу зумовлює збільшення сили тертя (тобто у виразі (10) для визначення сили тертя швидкість  $\dot{S}$  набуває значення  $V_a$ , оскільки чим більша швидкість  $V_a$ , тим більша сила тертя  $F_{tr}$ ).

Розроблена математична модель описує рух частинки  $M$  гички у довільний момент

часу з урахуванням основних конструктивних, кінематичних і силових параметрів, які впливають на протікання процесу завантаження гички у транспортний засіб, що рухається поруч із гичкозбиральною машиною.

Наступним етапом дослідження буде визначення абсолютної швидкості руху у просторі частинки  $M$  гички після виходу її з завантажувального механізму з врахуванням поступального руху гичкозбиральної машини.

## Висновки

Складено диференціальні рівняння руху частинки зрізаної гички цукрових буряків по циліндричній та прямолінійній ділянках кожуха завантажувального механізму гичкозбиральної машини. В результаті розв'язання цих рівнянь визначено закон руху частинки гички по внутрішній поверхні кожуха та закон зміни швидкості її руху як функцій від часу і конструктивних параметрів кожуха та кінематичних режимів повітряного потоку.

Числові розрахунки на ПК дали змогу побудувати графіки залежностей дугової координати  $S(t)$  та швидкості  $\dot{S}(t)$  від часу  $t$  в процесі руху частинки  $M$  по циліндричній ділянці кожуха завантажувального механізму

після її сходження з лопаті жбурлялки. Встановлено, що збільшення швидкості  $V_a$  сходження частинки  $M$  гички з кінця лопаті зумовлює зростання дугової координати  $S(t)$ . У разі зміни швидкості  $V_a$  від 4  $\text{м·с}^{-1}$  до 8  $\text{м·с}^{-1}$  значення дугової координати  $S(t)$  збільшується в 1,54 раза за час  $t = 0,06$  с. Також установлено, що збільшення швидкості  $V_a$  сходження частинки  $M$  гички з кінця лопаті сприяє інтенсивнішому зменшенню швидкості  $\dot{S}(t)$  з плином часу, тобто крива, що відповідає більшому значенню  $V_a$ , має більший нахил до горизонту. У межах зміни швидкості руху  $V_a$  від 4  $\text{м·с}^{-1}$  до 8  $\text{м·с}^{-1}$  нахил кривої зміни швидкості  $\dot{S}(t)$  збільшується приблизно вдвічі.

Bulgakov V.<sup>1</sup>, Adamchuk V.<sup>2</sup>, Holovach I.<sup>3</sup>, Ignatiev Ye.<sup>4</sup>, Trokhaniak O.<sup>5</sup>, Beloiev I.<sup>6</sup>, Ruzhylo M.<sup>7</sup>

<sup>1,3,5,7</sup>National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine; <sup>2</sup>Institute of Mechanics and

Automation of Agricultural Production National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, 11 Vokzalna Str., Glevakh village, Fastiv district, Kyiv region, 08631, Ukraine; <sup>4</sup>Tavrii State Agrotechnological University named after Dmytro Motorny, 66 Zhukovsky Str., Zaporizhzhia, 69600, Ukraine; <sup>6</sup>Rusen University «Angel Kinchev», 5 Studentska Str., Ruse, 7017, Bulgaria; e-mail: <sup>1</sup>vbulgakov@meta.ua, <sup>2</sup>vvadamchuk@gmail.com, <sup>3</sup>holovach.iv@gmail.com, <sup>4</sup>yevhen.ihnatiev@tsatu.edu.ua, <sup>5</sup>klendii\_o@ukr.net, <sup>6</sup>ibeloev@uni-ruse.bg, <sup>7</sup>masha.ruzhilo@ukr.net; ORCID: <sup>1</sup>0000-0003-3445-3721, <sup>2</sup>0000-0003-0358-7946, <sup>3</sup>0000-0003-1387-4789, <sup>4</sup>0000-0002-1770-8297, <sup>5</sup>0000-0003-0315-1595, <sup>6</sup>0000-0003-2014-1970, <sup>7</sup>0000-0002-8794-3495

### Theory of the movement of the cut sugar beet cut on the internal surface of the loading mechanism of the cut harvesting machine

**Goal.** Justification of the rational design parameters and operating modes of the developed new design of the loading mechanism of the sugar beet harvester by building a mathematical model of the movement of the cut sugar beet sugar beet on the inner surface of the discharge nozzle after it leaves the blade spreader. **Methods.** The research results presented in this work were obtained with the help of modeling methods, higher mathematics, theoretical mechanics, standard and developed computer programs for numerical calculations of the obtained mathematical models, and even methods of analysis of the obtained graphic dependencies between structural and kinematic parameters. **Results.** In order to substantiate the rational design parameters and operating modes of the new design of the loading mechanism of the sugar beet harvesting machine developed by us, a mathematical model of the movement of the cut sugar beet sugar beet on the inner surface of the discharge nozzle after its exit from the blade spreader was built. The movement of the gimbal is considered first along the cylindrical section of the casing and further along its rectilinear section.

The obtained differential equations describe the movement of a particle of sugar beet at an arbitrary moment in time, taking into account the main structural, kinematic and force parameters that affect the process of loading sugar beet sugar into a vehicle moving alongside the sugar beet harvester. The solution of the obtained differential equations on a PC made it possible to justify the rational design and kinematic parameters of the loading mechanism of the picker machine. **Conclusions.** The differential equations of motion of a particle of cut sugar beet husk along the cylindrical and rectilinear section of the casing of the loading mechanism of the sugar beet harvester were compiled. As a result of solving the obtained differential equations of motion of the particle of the swoosh, the law of its movement along the inner surface of the casing and the law of speed change as a function of time, as well as design parameters of the casing and kinematic modes of the air flow, were determined. As a result of numerical calculations on the PC, graphs of the dependence of the arc coordinate  $S(t)$  and speed  $\dot{S}(t)$  on time  $t$  were obtained during the movement of a particle  $M$  of cut sugar beet stalk along the cylindrical section of the casing of the loading mechanism after its descent from the scraper blade. It is established that speed increase  $V_a$  ascent particles  $M$  hiccups from the end blades leads to growth arc coordinate  $S(t)$ . Within the speed change  $V_a$  from  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  to  $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , the value of the arc coordinate  $S(t)$  increases by 1.54 times at time  $t = 0.06 \text{ s}$ . It has also been established that an increase in the speed  $V_a$  of the particle's descent  $M$  from the end of the blade leads to an increase in the intensity of the decrease in speed  $\dot{S}(t)$  over time, that is, the curve corresponding to a larger value  $V_a$  has a greater slope to the horizon. Within the limits of the speed  $V_a$  change from  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  to  $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , the slope of the speed  $\dot{S}(t)$  change curve increases approximately twice.

**Key words:** sugar beets, gheeka, loading, mathematical modeling, differential equations, rational parameters, graphical dependencies.

**DOI:** <https://doi.org/10.31073/agrovysnyk202311-07>

## Бібліографія

1. Holovach I. Development of mathematical model of cut haulm movement along working tool of loading mechanism. 18<sup>th</sup> International Scientific Conference (Jelgava, 22–24 May 2019). *Engineering for rural development. Proceeding.* 2019. V. 18. P. 264–271.
2. Погорелый Л.В., Татьянако Н.В. Свеклоуборочные машины: история, конструкция, теория, прогноз. Киев: Феникс, 2004. 232 с.
3. Bulgakov V., Ivanovs S., Ruzhilo Z., Golovach I. Theoretical investigations in cleaning sugar beet

- heads from remnants of leaves by cleaning blade. *Engineering for Rural Development. Proceedings.* 2016. V. 15. P. 1090–1097.
4. Merkes R. 50 Jahre Produktionstechnik im Zuckerr. *Benbau in Deutschland. Zuckerr.* 2001. № 4. P. 214–217.
5. Bulgakov V., Ivanovs S., Adamchuk V., Boris A. Experimental laboratory investigations of operating element for sugar beet top removal. *Engineering for Rural Development. Proceedings.* 2014. V. 13. P. 24–30.

6. Максаков В. Ботва, жом и мелисы при кормлении животных. Киев: Урожай, 1993. 145 с.

7. Василенко П.М. Введение в земледельческую механику. Київ: Сільгоспосвіта, 1996. 252 с.

8. Василенко П.М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. Киев: УАСХН, 1960. 283 с.

9. Bulgakov V., Ivanovs S., Adamchuk V., Boris A. Mathematical model for determination of losses of sugar bearing-mass when sugar beet tops are removed. *Engineering for Rural Development. Proceedings*. 2015. V. 14. P. 41–45.

10. Bulgakov V., Boris A., Ivanovs S. Mathematical model of interaction of operating element of top remover with head of root crop. *Engineering for Rural Development. Proceedings*. 2013. V. 12.

P. 115–120.

11. Хелемендик Н.М. Направления и методы разработки новых рабочих органов сельскохозяйственных машин: монография. Киев: Аграрна наука, 2001. 280 с.

12. Bulgakov V., Ivanovs S., Adamchuk V., Boris A. Experimental laboratory investigations of operating element for sugar beet top removal. *Engineering for Rural Development. Proceedings*. 2014. V. 13. P. 24–30.

13. Kibble T., Berkshire F. Classical Mechanics: 5th ed. Imperial College Press. 2004. 478 p.

14. Булгаков В.М., Головач І.В., Ружи́ло З.В. та ін. Теорія і технічні засоби для збирання гички буряків цукрових: монографія. Київ: Аграрна наука, 2021. 212 с.