



Механізація, електрифікація

УДК 658.562.2:635.11:633.63

© 2024

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ПОЛЬОТУ ЧАСТИНКИ ГИЧКИ БУРЯКУ ЦУКРОВОГО ПІД ЧАС СКОШУВАННЯ ГИЧКОЗБИРАЛЬНОЮ МАШИНОЮ

В.В. Адамчук¹, І.В. Головач², О.М. Троханяк³,
Є.І. Ігнат'єв⁴, Ю.Б. Гладьо⁵

¹доктор технічних наук, професор, академік НААН

²доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НААН

³⁻⁵кандидати технічних наук, доценти

¹Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва НААН
вул. Вокзальна, 11, смт Глеваха Фастівського р-ну Київської обл., 08631, Україна

^{2,3}Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна

⁴Таврійський державний агротехнологічний університет ім. Дмитра Моторного
вул. Жуковського, 66, м. Запоріжжя, 69600, Україна

⁵Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя
вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001, Україна

e-mail: ¹vadamchuk@gmail.com, ²holovach.iv@gmail.com, ³klendii_o@ukr.net,

⁴yevhen.ihnatiev@tsatu.edu.ua, ⁵gladyo@ukr.net

ORCID: ¹0000-0003-0358-7946, ²0000-0003-1387-4789,

³0000-0002-4671-5824, ⁴0000-0002-1770-8297, ⁵0009-0005-3064-790X

Надійшла 11.03.2024

Мета. Обґрунтувати раціональні конструктивні параметри та режими роботи розробленої конструкції вивантажувального механізму гичкозбиральної машини, які забезпечують високу продуктивність та рівномірність розкидання по поверхні бурякового поля гички буряків цукрових як органічного добрива. **Методи.** Для проведення теоретичних досліджень використовували методи математичного моделювання, вищої математики, теоретичної механіки, складання комп'ютерних програм та числових розрахунків на ПК, а також методи аналізу отриманих графічних залежностей. **Результати.** З метою обґрунтування раціональних параметрів і режимів роботи вивантажувального механізму гичкозбиральної машини нової конструкції побудовано математичну модель руху частинки гички після її вильоту із вивантажувального патрубку до досягнення поверхні поля. Отримана система диференціальних рівнянь описує політ частинки скошеної гички в довільний момент часу з урахуванням швидкості її вильоту з патрубка, впливу повітряного потоку й опору повітря, поступальної швидкості переміщення агрегату по полю, а також швидкості і напрямку вітру. Розв'язання отриманої системи диференціальних рівнянь

на ПК дало можливість визначити раціональні конструктивні та кінематичні параметри вивантажувального механізму, що забезпечують необхідну початкову швидкість вильоту частинок гички з вихідного патрубка, а отже, і необхідну дальність та рівномірність розкидання гички по полю. **Висновки.** Побудовано математичну модель руху частинки M гички після вильоту з вихідного патрубка вивантажувального механізму гичкозбиральної машини з урахуванням її поступального руху, а також впливу вітру на траєкторію польоту. Розв'язання на ПК отриманої системи нелінійних диференціальних рівнянь руху частинки M гички дало змогу визначити дальність, а також максимальну висоту польоту гички після її вильоту з вивантажувального патрубка і досягнення поверхні поля. Як показали розрахунки, залежність дальності польоту частинки від часу t близька до експоненціальної, і за час $t = 0,5$ с дальність польоту досягає $0,72$ м. За подальшого збільшення часу t дальність польоту частинки практично не змінюється. Водночас швидкість польоту частинки гички вздовж осі Oy за час $t = 0,5$ с інтенсивно зменшується від 22 м·с⁻¹ до нульового значення і при подальшому її переміщенні не змінюється. Протягом часу $t = 0,12$ с частинка гички піднімається вгору за рахунок кінетичної енергії вильоту з вивантажувального патрубка (початкової швидкості V_0). При $t > 0,12$ с частинка починає рухатися вниз за лінійним законом і за час $t = 1,85$ с досягає поверхні поля ($z = -2$ м). Протягом часу $t = 0,4$ с швидкість частинки вздовж осі Oz інтенсивно зменшується від 12 м·с⁻¹ до $-1,3$ м·с⁻¹, далі залишається незмінною до моменту досягнення поверхні поля. За від'ємних значень цієї швидкості частинка гички починає рух вниз і досягає поверхні поля.

Ключові слова: буряки цукрові, гичка, розкидання, математична модель, диференціальні рівняння, раціональні параметри, розв'язок на ПК.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202403-09>

Постановка проблеми. Під час збирання буряків цукрових важливою технологічною операцією вважається видалення гички з головок коренеплідів та її завантаження у транспортний засіб або розкидання по поверхні поля. Гичка є цінним кормом для худоби [1], сировиною для виробництва біогазу, а також цінним органічним добривом. Якісне збирання гички буряків цукрових — потрапляння щонайменшої її кількості в сировину для виробництва цукру, мінімальні втрати у разі використання як корму для худоби чи виробництва біогазу, а також рівномірне розкидання по поверхні поля за використання як органічного добрива — актуальне завдання, від виконання якого залежить максимально повне і раціональне використання цієї цінної сировини. Існує потреба у розробці більш досконалих конструкцій механізмів транспортування скошеної гички та її вивантаження за межі гичкозбиральної машини. Для обґрунтування раціональних конструктивних

і кінематичних параметрів нових конструкцій згаданих механізмів необхідно провести теоретичні й експериментальні дослідження зазначеного технологічного процесу.

Загалом результати теоретичних досліджень процесу переміщення скошеної маси гички буряків цукрових по робочих органах вивантажувального механізму гичкозбиральної машини від моменту її надходження у цей механізм до вильоту з його патрубка подані у працях [2, 3]. Також є низка інших досліджень, присвячених переміщенню частинки матеріалу поверхнею робочих органів сільськогосподарських машин [4–11]. У працях [12–16] наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень перспективних машин у галузі буряківництва.

У пропонованій роботі побудовано нову математичну модель руху частинки гички після її вильоту з вихідного патрубка вивантажувального механізму гичкозбиральної машини до досягнення поверхні поля.

Мета досліджень — визначити й обґрунтувати раціональні конструктивні параметри та режими роботи розробленого вивантажувального механізму гичкозбиральної машини, що забезпечують високу продуктивність і рівномірність розкидання гички буряків цукрових по поверхні поля.

Матеріали і методи досліджень. Теоретичні дослідження проводили із застосуванням методів математичного моделювання, вищої математики, теоретичної механіки, складання комп'ютерних програм і числових розрахунків на ПК, а також методів аналізу отриманих графічних залежностей.

Результати досліджень. Щоб скласти диференціальне рівняння руху частинки М гички, авторами побудовано еквівалентну схему її переміщення із зазначенням усіх сил, що діють на неї. На цій схемі зображено кінець вивантажувального патрубку, з якого в точці О вилітає частинка М гички з початковою швидкістю V_0 під кутом α_0 до горизонтальної площини, причому вектор \vec{V}_0 спрямований перпендикулярно до поступального переміщення гичкозбиральної машини, тобто $\vec{V}_0 \perp \vec{V}_t$, де V_t — поступальна швидкість гичкозбиральної машини (рис. 1).

Частинка М гички показана в довільний момент часу t . Вектор \vec{V} позначає швидкість польоту цієї частинки без урахування поступального руху гичкозбиральної машини та впливу вітру. Розглянуто два важливі випадки, а саме коли вектор \vec{V}_w швидкості вітру спрямований у бік поступального руху гичкозбиральної машини і коли він спрямований у протилежний бік. Сумарний вектор швидкості поступального руху машини та вітру подано як вектор, що дорівнює $\vec{V}_t \pm \vec{V}_w$. При цьому $\vec{V}_t \pm \vec{V}_w$ означає рух машини проти вітру, а $\vec{V}_t - \vec{V}_w$ — її рух за вітром. У такому разі $\vec{V} + (\vec{V}_t \pm \vec{V}_w)$ є швидкістю частинки М гички з урахуванням поступального руху гичкозбиральної машини та впливу вітру.

Для опису польоту частинки М гички вибрано просторову декартову систему координат $Oxyz$. Початок координат (точка О) співпадає з точкою вильоту частинки М з патрубку, причому точка О розташована на висоті H над рівнем поля. Вісь Ox спрямована у напрямку поступального руху гичкозбиральної машини, вісь Oy — перпендикулярно до осі Ox і праворуч

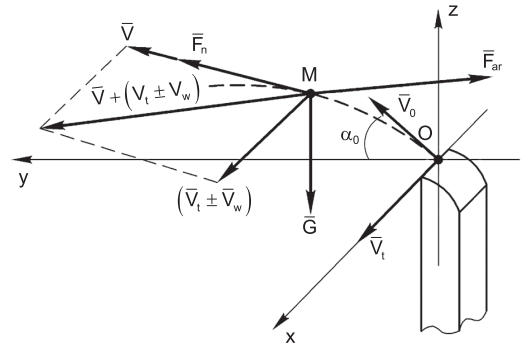


Рис. 1. Еквівалентна схема руху частинки М зрізаної гички після її вильоту з патрубку вивантажувального механізму

по ходу руху машини, а вісь Oz — вертикально вгору, тобто перпендикулярно до горизонтальної площини Oxy .

На еквівалентній схемі також показано всі сили, що діють на частинку М гички під час її польоту. Передусім на неї діє сила тяжіння G , яка, як відомо, дорівнює:

$$G = mg, \quad (1)$$

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

Далі, у площині yOz , діє сила \vec{F}_n тиску повітряного потоку, яка є головною рушійною силою в момент вильоту частинки М гички з вивантажувального патрубку та її подальшого руху в повітряному середовищі. Згідно з [9], ця сила визначається за допомогою такого виразу:

$$F_n = k(V_n - V)^2, \quad (2)$$

де V_n — швидкість повітряного потоку; V — швидкість руху частинки М гички в довільний момент часу t ; k — коефіцієнт, що залежить від фізико-механічних властивостей гички. У разі руху в повітрі коефіцієнт k дорівнює:

$$k = adF, \quad (3)$$

де a — константа, що залежить від форми частинки та міделевого перерізу; F — міделевий переріз; d — щільність повітря.

Крім зазначених сил на частинку М гички діє сила \vec{F}_{ar} опору повітря, яка визначається за таким виразом:

$$F_{ar} = \lambda \left[(V_x + V_t \pm V_w)^2 + V_y^2 + V_z^2 \right], \quad (4)$$

де V_x, V_y, V_z — проєкції вектора \vec{V} на осі Ox, Oy та Oz ; $(V_x + V_t \pm V_w)^2 + V_y^2 + V_z^2$ — квадрат модуля швидкості частинки з урахуван-

ням поступального руху агрегата та швидкості вітру; λ — коефіцієнт пропорційності.

З урахуванням наведених на еквівалентній схемі сил рівняння польоту частинки М можна записати у векторній формі:

$$m\bar{a} = \bar{F}_n + \bar{F}_{ar} + \bar{G}, \quad (5)$$

де \bar{a} — прискорення цієї частинки. Рівняння було спроектовано на осі Ox , Oy та Oz декартової системи координат $Oxyz$. Для цього визначили проєкції згаданих сил на зазначені осі координат:

$$F_{nx} = 0; \quad (6)$$

$$F_{ny} = k(V_n - V)^2 \frac{\dot{y}}{V} = k(V_n - Q)^2 \cdot \frac{\dot{y}}{Q}, \quad (7)$$

де $Q = \sqrt{(\dot{x} + V_t \pm V_w)^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}$.

$$F_{nz} = k(V_n - V)^2 \frac{\dot{z}}{V} = k(V_n - Q)^2 \cdot \frac{\dot{z}}{Q}; \quad (8)$$

$$F_{arx} = -\lambda \left[(V_x + V_t \pm V_w)^2 + V_y^2 + V_z^2 \right] \times \frac{(V_x + V_t \pm V_w)}{\sqrt{(V_x + V_t \pm V_w)^2 + V_y^2 + V_z^2}} = -\lambda \sqrt{(\dot{x} + V_t \pm V_w)^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} \times (\dot{x} + V_t \pm V_w); \quad (9)$$

$$F_{ary} = \lambda \left[(V_x + V_t \pm V_w)^2 + V_y^2 + V_z^2 \right] \times \frac{V_y}{\sqrt{(V_x + V_t \pm V_w)^2 + V_y^2 + V_z^2}} = -\lambda \cdot Q \cdot \dot{y}; \quad (10)$$

$$F_{arz} = -\lambda \left[(V_x + V_t \pm V_w)^2 + V_y^2 + V_z^2 \right] \times \frac{V_z}{\sqrt{(V_x + V_t \pm V_w)^2 + V_y^2 + V_z^2}} = -\lambda \cdot Q \cdot \dot{z}; \quad (11)$$

$$G_x = 0; G_y = 0; G_z = -mg. \quad (12)$$

Вважатимемо, що сила F_n тиску повітряного потоку після вильоту частинки гички з вивантажувального патрубку швидко

зникає, адже дальність її польоту залежати-ме лише від початкової швидкості V_0 вильоту і сил опору. Тому в першому наближенні цією силою можна знехтувати.

Тоді, з урахуванням виразів (9) – (12), отримуємо таку систему диференціальних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= -\lambda \cdot Q \cdot (\dot{x} + V_t \pm V_w), \\ m\ddot{y} &= -\lambda \cdot Q \cdot \dot{y}, \\ m\ddot{z} &= -\lambda \cdot Q \cdot \dot{z} - mg. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Початкові умови для системи диференціальних рівнянь (13) мають вигляд:

При $t = 0$:

$$x = 0, y = 0, z = 0,$$

$$\dot{x} = 0, \dot{y} = V_0 \cos \alpha_0, \dot{z} = V_0 \sin \alpha_0. \quad (14)$$

Система рівнянь (13) є системою нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку, розв'язати яку можна лише наближеними числовими методами за допомогою ПК. Для кожного конкретного набору вхідних параметрів на k -му кроці розрахунку можна знайти розв'язок цієї системи як трійку чисел $\{x_k, y_k, z_k\}$, де $x_k = x(t_k)$, $y_k = y(t_k)$, $z_k = z(t_k)$, t_k — час польоту частинки М. Розрахунок слід проводити до n -го кроку, за якого буде отримано трійку чисел $\{x_n, y_n, -H\}$. Це означатиме, що частинка М гички досягла поверхні поля.

У такому випадку дальність L польоту частинки М становитиме:

$$L = \sqrt{x_n^2 + y_n^2}. \quad (15)$$

Максимальною висотою польоту частинки М буде на етапі розрахунку, на якому буде отримано трійку таких чисел:

$$\{x_s, y_s, z_s\},$$

$$\text{де } z_s = \max z_k \Big|_{k=1}^n. \quad (16)$$

Максимальна висота H_n польоту частинки М над поверхнею поля дорівнює:

$$H_n = H + z_s. \quad (17)$$

У разі завантаження гички у транспортний засіб, що рухається поруч із гичкозбиральною машиною, розрахунок необхідно проводити до деякого r -го кроку — до отримання розв'язку $\{x_r, y_r, -H + H_{np}\}$, де H_{np} — висота причепа. В такому випадку дальність польоту частинки гички у причіп становитиме:

$$L_{np} = \sqrt{x_r^2 + y_r^2}. \quad (18)$$

Далі, на підставі результатів розв'язку системи диференціальних рівнянь (13), можна побудувати графіки дальності польоту частинки гички залежно від її початкової швидкості вильоту та кута нахилу вектора цієї швидкості до горизонту у випадку, коли вектор \vec{V}_w швидкості вітру спрямований у бік поступального руху гичкозбиральної машини, та у випадку, коли цей вектор спрямований у протилежний бік. Також, із використанням виразів (16) та (17), можна визначити максимальну висоту H_n польоту частинки гички над поверхнею поля.

Розрахунок проведено за таких параметрів технологічного процесу: поступальна швидкість сільськогосподарського агрегату $V_t = 2 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$; швидкість вітру $V_w = 2 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$; швидкість повітряного потоку $V_n = 25 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$; кут нахилу вектора V_0 до горизонту $\alpha_0 = 30^\circ$; коефіцієнт пропорційності $\lambda = 0,05$; маса

частинки гички $m = 0,01 \text{ кг}$; висота вивантажувального патрубку $H = 2 \text{ м}$.

Унаслідок розрахунку отримано графіки дальності польоту частинки гички вздовж осі Oy (перпендикулярно до напрямку руху агрегата) від точки O вильоту (рис. 2, а) та швидкості руху частинки вздовж осі Oy (рис. 2, б) як функцій від часу t , до моменту досягнення частинкою поверхні поля.

Згідно з рис. 2, а залежність дальності польоту частинки від часу t близька до експоненціальної, і за час $t = 0,5 \text{ с}$ дальність польоту досягає $0,72 \text{ м}$. За подальшого збільшення часу t дальність польоту частинки практично не змінюється. При цьому швидкість польоту, як свідчить графік на рис. 2, б, за час $t = 0,5 \text{ с}$ інтенсивно зменшується від $22 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ до нульового значення і при подальшому переміщенні частинки не змінюється.

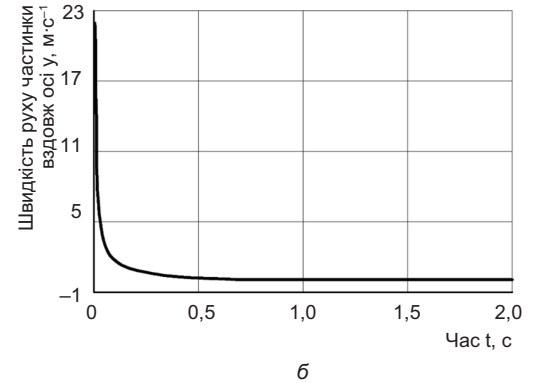
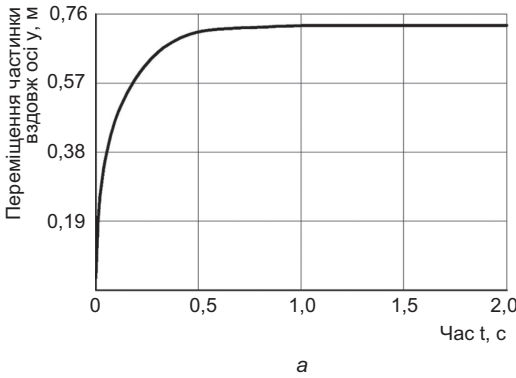


Рис. 2. Графіки дальності польоту (а) частинки гички від точки O вильоту та її швидкості руху (б) вздовж осі Oy

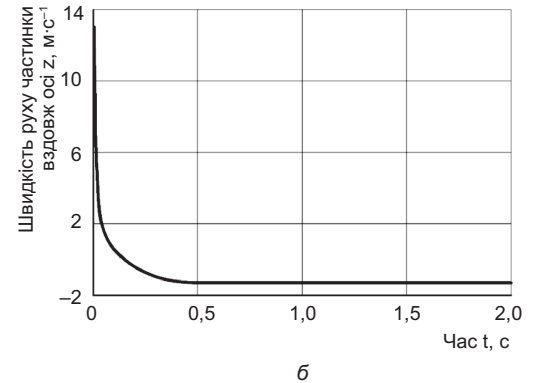
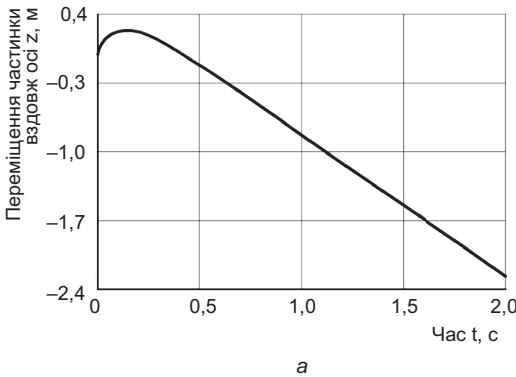


Рис. 3. Графіки дальності польоту (а) частинки гички та її швидкості руху (б) вздовж осі Oz

На рис. 3, а подано графік зміни дальності польоту частинки гички вздовж осі Oz від часу t . Протягом часу $t = 0,12$ с частинка гички піднімається вгору за рахунок кінетичної енергії вильоту з вивантажувального патрубку (початкової швидкості V_0). При $t > 0,12$ с частинка починає рухатися вниз за лінійним законом і за час $t = 1,85$ с досягає поверхні поля ($z = -2$ м).

Графік зміни швидкості частинки гички вздовж осі Oz від часу t подано на рис. 3, б. Протягом часу $t = 0,4$ с швидкість частинки вздовж осі Oz інтенсивно зменшується від $12 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ до $-1,3 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, далі залишається незмінною до моменту досягнення нею поверхні поля. За від'ємних значень цієї швидкості частинка гички починає рух вниз і досягає поверхні поля.

Висновки

Побудовано математичну модель руху частинки M гички після вильоту з вихідного патрубка вивантажувального механізму гичкозбиральної машини з урахуванням її поступального руху, а також впливу вітру на траєкторію польоту гички. Розв'язання отриманої системи нелінійних диференціальних рівнянь руху частинки M гички за допомогою ПК дало змогу розрахувати дальність польоту гички після її вильоту з вивантажувального патрубка і досягнення поверхні поля. Як показали розрахунки, залежність дальності польоту частинки від часу t близька до експоненціальної, і за час $t = 0,5$ с дальність польоту досягає $0,72$ м. За подальшого збільшення часу t дальність польоту частинки практично не змінюється.

Водночас швидкість польоту частинки гички вздовж осі Oz за час $t = 0,5$ с інтенсивно зменшується від $22 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ до нульового значення і при подальшому її переміщенні не змінюється. Протягом часу $t = 0,12$ с частинка гички піднімається вгору за рахунок кінетичної енергії вильоту з вивантажувального патрубка (початкової швидкості V_0). При $t > 0,12$ с частинка починає рухатися вниз за лінійним законом і за час $t = 1,85$ с досягає поверхні поля ($z = -2$ м). Протягом часу $t = 0,4$ с швидкість частинки вздовж осі Oz інтенсивно зменшується від $12 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ до $-1,3 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, далі залишається незмінною до моменту досягнення нею поверхні поля. За від'ємних значень цієї швидкості частинка гички починає рух вниз і досягає поверхні поля.

Adamchuk V.¹, Holovach I.², Trokhaniak O.³, Ignatiev Ye.⁴, Hlado Yu.⁵

¹Institute of Mechanics and Automation of Agricultural Production of NAAS, 11 Vokzalna Str., Glevakh village, Fastiv district, Kyiv region, 08631, Ukraine;

^{2,3}National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine; ⁴Tavrii State Agrotechnological University named after Dmytro Motomy, 66 Zhukovsky Str., Zaporizhzhia, 69600, Ukraine; ⁵Temopil Ivan Puluj National Technical University; e-mail: ¹vvadamchuk@gmail.com, ²holovach.iv@gmail.com, ³klendij_o@ukr.net, ⁴yevhen.ihnatiev@tsatu.edu.ua; ⁵gladyo@ukr.net; ORCID: ¹0000-0003-0358-7946, ²0000-0003-1387-4789, ³0000-0002-4671-5824, ⁴0000-0002-1770-8297, ⁵0009-0005-3064-790X

Theoretical study of the flight range of sugar beet chaff when it is mowed by a chaff harvesting machine

Goal. To justify the rational design parameters and modes of operation of the developed design of the unloading mechanism of the sugar beet

harvester, which ensure high productivity and uniformity of sugar beet spread over the surface of the beet field as an organic fertilizer. **Methods.** To conduct theoretical research, methods of mathematical modeling, higher mathematics, theoretical mechanics, methods of compiling computer programs and numerical calculations on a PC, as well as analysis of the obtained graphic dependencies were used. **Results.** In order to justify the rational parameters and modes of operation of the unloading mechanism of the newly designed chaff harvesting machine developed by us, a mathematical model of the chaff particle movement after its departure from the discharge nozzle of the specified mechanism before reaching the field surface was built. The obtained system of differential equations describes the flight of a particle of mowed hickory at an arbitrary moment of time, taking into account the speed of its departure from the discharge nozzle, the influence of the air flow and air resistance, which takes into account the translational speed of the movement of the unit across the field, as well as the speed and direction of the wind. Solving

the resulting system of differential equations on a PC made it possible to determine the rational design and kinematic parameters of the unloading mechanism, which ensure the necessary initial speed of departure of the chaff particles from the discharge nozzle, and, therefore, the required range and uniformity of the chaff spread over the field. **Conclusions.** A mathematical model of the movement of a chaff particle after its departure from the outlet of the discharge mechanism of the chaff harvesting machine was built, taking into account its translational movement, as well as the influence of the wind on the flight trajectory of the chaff. The solution of the resulting system of nonlinear differential equations of motion of a sedge particle using a PC made it possible to calculate the range of the sedge's flight after it left the discharge nozzle and reached the field surface. As the calculations show, the dependence of the flight range of the particle on time t is close to exponential, and in time $t = 0.5$ s the flight range reaches 0.72 m. With a further

increase in time t , the flight range of the particle practically does not change. At the same time, the flight speed of the particle of the string along the Oy axis during the time $t = 0.5$ s intensively decreases from $22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ to zero and does not change during its further movement. During the time $t = 0.12$ s, the particle of the straw rises up due to the kinetic energy of the particle's departure from the discharge nozzle (initial speed V_0). At $t > 0.12$ s, the particle begins to move downward according to a linear law and reaches the surface of the field ($z = -2$ m) in time $t = 1.85$ s. During the time $t = 0.4$ s, the velocity of the particle along the Oz axis decreases intensively from $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ to $-1.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, then remains constant until the particle reaches the surface of the field. At negative values of this speed, the particle of the hen starts to move down and reaches the surface of the field.

Key words: sugar beets, buttermilk, scattering, mathematical model, differential equations, rational parameters, solution on PC.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202403-09>

Бібліографія

1. Merkes R. 50 Jahre Produktionstechnik im Zuckerr. Benbau in Deutschland. Zuckerr. 2001. N 4. P. 214–217.
2. Адамчук В.В., Булгаков В.М., Головач І.В. та ін. Теоретичне дослідження транспортування гички буряків цукрових завантажувальним механізмом гичкозбиральної машини. Вісник аграрної науки. 2023. № 9. С. 52–61.
3. Булгаков В.М., Адамчук В.В., Головач І.В. та ін. Теорія руху зрізаної гички буряку цукрового по внутрішній поверхні завантажувального механізму гичкозбиральної машини. Вісник аграрної науки. 2023. № 11. С. 51–59.
4. Погорельый Л.В., Татьяна Н.В. Свеклоуборочные машины: история, конструкция, теория, прогноз. Киев: Феникс, 2004. 232 с.
5. Bulgakov V., Ivanovs S., Ruzhylo 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.
6. 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.
7. Максаков В. Ботва, жом и мелисы при кормлении животных. Киев: Урожай, 1993. 145 с.
8. Василенко П.М. Введение в земледельческую механику. Киев: Сільгоспосвіта, 1996. 252 с.
9. Василенко П.М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. Киев: УСХА, 1960. 284 с.
10. 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.
11. 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.
12. Хелемендик Н.М. Направления и методы разработки новых рабочих органов сельскохозяйственных машин: монография. Киев: Аграрна наука 2001. 280 с.
13. 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.
14. Kibble T., Berkshire F. Classical Mechanics: 5th ed. London: Imperial College Press, 2004. 478 p.
15. Булгаков В.М., Супливец А.О. Универсальная косилка-измельчитель для фермерских хозяйств. Технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: мат. международ. науч.-техн. конф. Секция 3: Технический прогресс в животноводстве. Глевахва: ИМЭСХ УААН, 1997. С. 14–16.
16. Булгаков В.М., Головач І.В., Ружилю З.В. та ін. Теорія і технічні засоби для збирання гички буряків цукрових: монографія. Київ: Аграрна наука, 2021. 212 с.