

УДК 631.361.8

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ПЕРЕМІЩЕННЯ ПОДРІБНЕНИХ
КОРЕНЕПЛОДІВ ШНЕКОВИМ ТРАНСПОРТЕРОМ-ПОДРІБНЮВАЧЕМ**

Юрій Грицай, к. т. н.

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,
бул. Руська, 56, м. Тернопіль, Україна,
e-mail: yurahrytsay@yahoo.com.ua*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2018.01.161>

Постановка проблеми. Згідно з концепцією переходу України до сталого розвитку, одним зі стратегічних заходів у промисловому секторі є збільшення продуктивності та зменшення енерговитрат процесу роботи шнекових транспортерів, що застосовуються на технологічних лініях переробки сировини агропромислового сектору для виробництва різнопланової народногосподарської продукції.

У загальній структурі витрат виробництва продукції тваринництва до 50...70 % припадає на заготівлю та приготування кормів [1]. Ці витрати можна істотно зменшити, якщо виробництво або переробку продукції на корм здійснювати не на спеціалізованих заводах, а у внутрішньогосподарських підприємствах, використовуючи власну сировину та мінімізуючи транспортні витрати.

У цьому разі забезпечується можливість оперативного контролю за ходом технологічного процесу приготування кормів та внесення необхідних коректив у роботу технологічного обладнання. Для ефективної роботи такого підприємства необхідне устаткування, яке повністю задовольняє вимоги ресурсозбереження за гарантованого забезпечення необхідної якості продукції [14].

Тваринницька галузь сільського господарства є основним споживачем кормів. Оскільки жоден вид кормів не містить достатньої кількості компонентів (поживних речовин, вітамінів, мікроелементів тощо), які необхідні тваринам, згодовування окремих видів кормів призводить до того, що тварини повільно розвиваються. Віддача від них знижується, зростають витрати на одиницю виробленої продукції, що призводить до зниження рентабельності виробництва продукції загалом [3].

При цьому якісні корми збільшують загальну поживність і забезпечують загальну потребу організму сільськогосподарських тварин

(свиней, великої рогатої худоби, коней тощо) корисними речовинами в необхідній кількості та в їх необхідних співвідношеннях, що дозволяє на 15...20 % підвищити загальну фізіологічну продуктивність тварин [10].

Важливим чинником, який визначає собівартість вироблених кормів, є показники використання технічних засобів попередньої підготовки та переробки компонентів аграрної продукції, які застосовуються в складі технологічних ліній (кормоцехів) самого аграрного підприємства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробка високоефективних технологічних процесів одночасного подрібнення та переміщення як одиничних кускових, так і сипких продуктів аграрного виробництва вимагає інтегрованого наукового підходу до розв'язання технічної задачі підвищення технологічних показників роботи та розширення технологічних можливостей шнекових транспортерів-подрібнювачів [8; 19].

Поставлені завдання вирішуються на основі розробки методології та методики обґрунтування технологічного процесу та розрахунку технологічних показників і конструктивно-кінематичних параметрів та режимів роботи шнекових транспортерів.

Підвищення продуктивності шнекових механізмів і технологічних ліній будь-яких виробничих переробних комплексів загалом, у тому числі машин для переробки аграрної продукції, багато в чому залежить від пропускну здатності завантажувальних бункерів і безпосередньо шнекового транспортера, які функціонують не тільки як робочі органи для переміщення продукту, а й ті, які застосовуються у вигляді дозувальних пристроїв. При цьому вони комплектуються системами автоматизованого управ-

ління та диференційованого регулювання секундної подачі продуктів переробки у досить широкому діапазоні та їх рівномірного розподілу по площі випускного отвору бункера та випускної горловини шнека [6; 24].

Питома вага шнекових транспортерів у вантажно-розвантажувальних операціях аграрних підприємств становить від 40 до 50 % [27]. При цьому шнекові транспортери виконують різнопланові технологічні завдання: змішування, подрібнення, дозування продуктів під час приготування й роздачі кормів; протруювання матеріалу; переміщення продуктів рослинництва і тваринництва тощо [7; 22; 25].

На основі аналізу технологічних процесів функціонування шнекових транспортерів [5; 20; 28] встановлено, що питання одночасного подрібнення й переміщення коренеплодів гвинтовими механізмами в наукових працях розкрито недостатньо. При цьому існують значні технологічні спроможності та наукові передумови для розробки шнекових транспортерів з комбінованим робочим органом, які можуть забезпечувати ефективне виконання суміжних функціональних

операцій одночасного подрібнення та переміщення продуктів.

Тому, незважаючи на значний обсяг методів і принципів розробки аналітичних моделей, які описують процеси переміщення продуктів шнековими транспортерами [2; 11–13; 16; 23; 26], є певні обмеження щодо їх застосування та щодо можливості аналітичного обґрунтування основних параметрів робочих органів гвинтових транспортних механізмів.

Постановка завдання. Ефективна робота підприємства залежить від компонування обладнання технологічних ліній, яке слід здійснювати за блочно-модульним принципом, що дає змогу мінімізувати допоміжні передавальні (транспортні) операції та забезпечити можливість зміни режимів роботи цеху, зменшити витрати енергоресурсів за гарантованого забезпечення якості продукції. Ці положення можуть бути реалізовані на прикладі можливої структурної схеми виробництва (приготування) різних кормів фермерським господарством у процесі переробки продукції аграрного сектору (рис. 1).

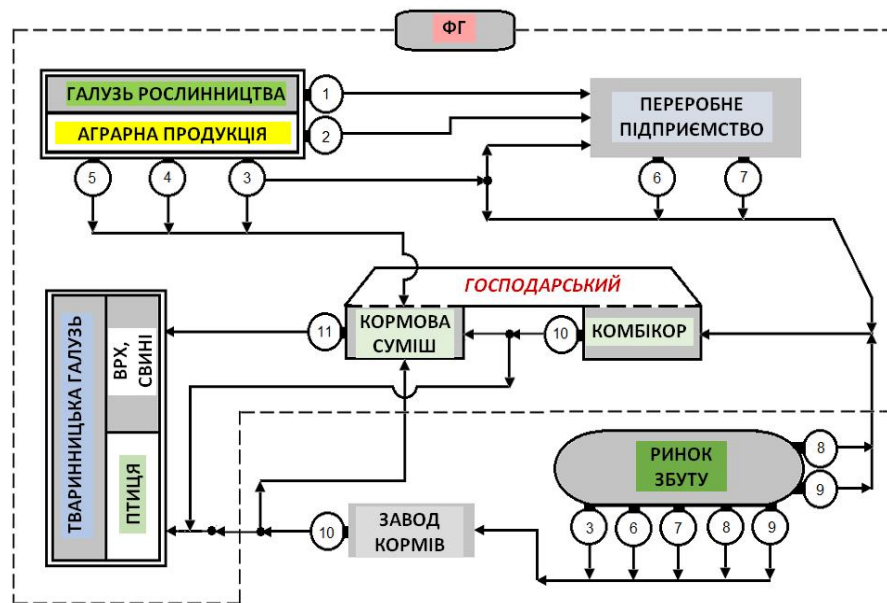


Рис. 1. Структурна схема варіантів технології отримання повнораціонних комбікормів і кормових сумішей у господарстві:

- 1 – трава; 2 – насіння олійних культур; 3 – зерно; 4 – грубі корми; 5 – коренеплоди;
6 – трав'яна мука; 7 – відходи переробки зерна та олійного насіння; 8 – білково-мінеральні добавки;
9 – премікси; 10 – повнораціонні комбікорми; 11 – повнораціонні кормові суміші

Fig. 1. Structural scheme of variants of technology of obtaining full-fodder mixed fodders and feed mixtures in the household:

- 1 – grass; 2 – seeds of oil crops; 3 – grain; 4 – rough feed; 5 – root crops; 6 – herbal flour;
7 – waste of processing of grain and oilseeds; 8 – protein-mineral supplements;
9 – premixes; 10 – full-fodder feed; 11 – full-fledged feed mixtures

У цьому контексті якісне та повноцінне забезпечення тварин соковитими кормами, які отримують шляхом переробки коренеплодів, є одним із важливих завдань в узагальненій задачі підвищення фізіологічної продуктивності сільськогосподарського поголів'я тварин.

Введення соковитих кормів (продуктів переробки коренеплодів кормових буряків) до раціону дійних корів збільшує молочну продуктивність на 10,3 %, засвоєння органічних речовин – на 5...8 %, використання азоту – на 3...5 %. Загалом коренеплоди сприяють збільшенню поїдання кормів тваринами на 8...11 % [1–3; 14].

Метою дослідження є розширення технологічних можливостей шнекових транспортерів внаслідок розробки комбінованих робочих органів, які забезпечують одночасне подрібнення та переміщення коренеплодів у процесі їх підготовки та переробки на соковиті корми. Основними завданнями досліджень, які забезпечують реалізацію сформульованої мети, є обґрунтування параметрів комбінованого робочого органа шнекового транспортера-подрібнювача за умови зменшення енерговитрат процесу роботи технічних засобів, які застосовуються на технологічних лініях переробки коренеплодів.

Існуючі технологічні процеси та виконавчі технічні засоби для переробки коренеплодів на соковитий корм (рис. 2) передбачають попередні підготовчі операції вивезення коренеплодів зі сховища, їх транспортування до технічних засобів, які подрібнюють коренеплоди, подальші операції переміщення (транспортування) подрібнених ко-

ренеплодів до змішувачів-запарників, завершальні операції вивантаження корму та його механізованого роздавання тваринам.

На основі аналізу існуючої узагальненої структурної схеми операцій переробки коренеплодів на корм тваринам (див. рис. 1) висунуто наукову гіпотезу про можливість поєднання двох суміжних технологічних операцій, які виконуються окремими механізмами (подрібнення коренеплодів коренерізкою і транспортування подрібнених частин коренеплодів до змішувачів-запарників стрічковим транспортером), в одну технологічну операцію одночасного подрібнення і транспортування («подрібнення + транспортування», див. рис. 2). Цю поєднану технологічну операцію може реалізовувати один гвинтовий технічний засіб – шнековий транспортер з комбінованим робочим органом [15].

Реалізація такого технічного рішення в умовах виробництва забезпечить ефективне поєднання суміжних функціональних операцій, таких як подрібнення та одночасне транспортування коренеплодів одним удосконаленим комбінованим робочим органом шнекового транспортера, який змонтовано на технологічній лінії, призначеній для їх переробки, та значно зменшить загальну енергоємність процесу порівняно з існуючою технологією за рахунок усунення додаткового (проміжного) операційно-технологічного засобу (коренерізки) як окремого технічного елемента, що має певну матеріаломісткість і певні енергозатрати для незалежного приводу робочих органів.

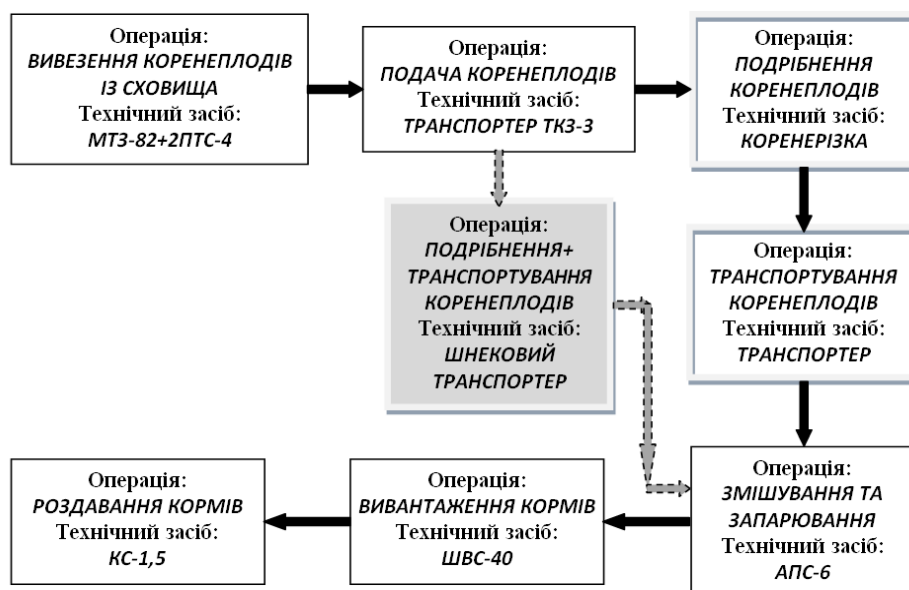


Рис. 2. Узагальнена структурна схема основних операцій переробки коренеплодів на корм

Fig. 2. Generalized structural scheme of basic operations of root crop processing for feed

Виклад основного матеріалу. Для розробки математичної моделі процесу переміщення подрібнених частин коренеплодів шнековим конвеєром розглянемо схему сил, що діють на частинку подрібнених коренеплодів (рис. 3). Розглянемо переміщення частини 5 (див. рис. 3) подрібнених коренеплодів, яка знаходиться в точці M , що розташована на поверхні спірального витка 4, який встановлено на барабані 3 шнекового конвеєра 2 шнекового транспортера-подрібнювача.

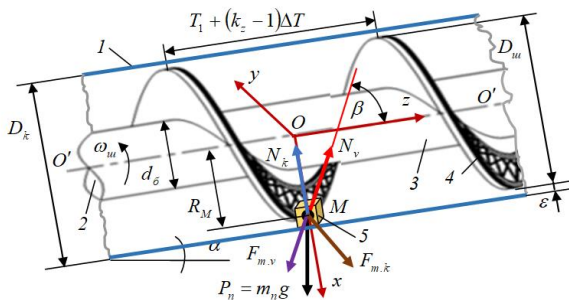


Рис. 3. Схема сил, які діють на частину подрібнених коренеплодів:

1 – напрямна труба; 2 – шнековий конвеєр; 3 – барабан; 4 – спіральний виток; 5 – частина подрібнених коренеплодів

Fig. 3. Scheme of forces acting on a part of shredded roots:

1 – guiding pipe; 2 – screw conveyor; 3 – drum; 4 – spiral turn; 5 – part of shredded root crops

Приймаємо припущення, що частина 4 подрібнених коренеплодів як тіло масою m_n рухається по поверхні спірального витка під час його обертання з кутовою швидкістю $\omega_{ш}$ без відриву від робочої поверхні витка.

Для розробки математичної моделі функціонування шнекового конвеєра транспортера-подрібнювача введемо нерухому просторову систему координат $Oxyz$, зв'язану з напрямною трубою, початок відліку якої знаходиться на осі $O'O'$ обертання вала шнекового конвеєра, а вісь Oz збігається з віссю $O'O'$. При цьому вісь Ox спрямована вниз, а вісь Oy – горизонтально.

Нехай у момент часу $t_0 = 0$ початковий кут повороту витка шнекового конвеєра дорівнює $\phi_0 = \text{const}$, а тіло подрібненої частини коренеплодів знаходиться на поверхні спірального витка в точці M , крок якого, залежно від кількості змінних кроків k_z , дорівнює $T_1 + (k_z - 1)\Delta T$.

За певний проміжок часу t виток шнекового конвеєра повернеться на кут $j(t) = 2\pi w_{ш} t + j_0$, де

$\omega_{ш}$ – кутова швидкість шнекового конвеєра, рад/с; ϕ_0 – початковий кут повороту шнекового конвеєра в момент часу $t_0 = 0$, рад.

Згідно з [17; 18], крім обертального руху, шнековий конвеєр здійснює рух у площині xOy , яка перпендикулярна до осі обертання барабана шнекового конвеєра, тобто осі $O'O'$, при цьому за початкової координати $x_0 = 0$ цей плоскопаралельний рух можна задати канонічним рівнянням руху центра обертання осі вала шнекового конвеєра

$$[x_0(t); y_0(t); z_0(t)] = [x_0(t); y_0(t); 0], t \geq 0, \quad \text{а}$$

зміну координат x і y за певний проміжок часу t згідно з положеннями [18] можна подати у вигляді функціоналів

$$x(t) = -f_x [j(t) \cos j(t)] + g [j(t) \sin j(t)];$$

$$y(t) = -f_y [j(t) \sin j(t)] - g [j(t) \cos j(t)].$$

Під час обертання шнекового конвеєра на тіло подрібнених коренеплодів, об'єм якого дорівнює V_m та яке розташоване у точці M , діють такі сили:

– сила ваги $P_n = m_n g = V_m r_k g$, Н, де m_n , V_m – відповідно маса, кг, та об'єм, m^3 , тіла подрібнених коренеплодів; r_k – питома маса коренеплодів, kg/m^3 ;

– сила реакції спірального витка $N_v = R_v n_v$ шнекового конвеєра, Н, де R_v – реакція в'язі робочої поверхні спірального витка, Н; n_v – одинична нормаль до робочої поверхні спірального витка;

– сила реакції робочої (внутрішньої) поверхні напрямної труби $N_k = R_k n_k$ шнекового транспортера-подрібнювача, Н, де R_k – реакція в'язі робочої поверхні напрямної труби, Н; n_k – одинична нормаль до робочої поверхні напрямної труби шнекового транспортера-подрібнювача;

– сила тертя ковзання тіла подрібнених коренеплодів по робочій поверхні спірального витка шнекового конвеєра $F_{m.v} = N_v f_v$, Н, де f_v – коефіцієнт тертя ковзання тіла подрібнених коренеплодів по поверхні спірального витка;

– сила тертя ковзання тіла подрібнених коренеплодів по робочій поверхні напрямної труби шнекового транспортера-подрібнювача $F_{m.k} = N_k f_k$, Н, де f_k – коефіцієнт тертя ковзання тіла подрібнених коренеплодів по поверхні напрямної труби шнекового транспортера-подрібнювача.

Розглянемо два можливі випадки переміщення тіла подрібнених коренеплодів робочими органами шнекового транспортера-подрібнювача:

– тіло подрібнених коренеплодів рухається по робочій поверхні спірального витка без контакту з внутрішньою поверхнею напрямної труби – I випадок;

– тіло подрібнених коренеплодів рухається одночасно по робочій поверхні спірального витка та внутрішній поверхні напрямної труби – II випадок.

Згідно з класичними законами механіки запишемо рівняння руху тіла подрібнених коренеплодів у нерухомій системі координат $Oxuz$ для I та II випадків у векторній формі запису:

$$m_n \frac{d^2 \mathbf{R}_M}{dt^2} = \mathbf{P} + \mathbf{N}_v + \mathbf{F}_{m.v}; \quad t > 0; \quad (1)$$

$$m_n \frac{d^2 \mathbf{R}_M}{dt^2} = \mathbf{P} + \mathbf{N}_v + \mathbf{N}_k + \mathbf{F}_{m.v} + \mathbf{F}_{m.k}; \quad t > 0, \quad (2)$$

$$V_n r_k \frac{d^2 \mathbf{R}_M}{dt^2} = m_n \mathbf{g} + \mathbf{R}_v \mathbf{n}_v + \mathbf{N}_v f_v; \quad t > 0; \quad (3)$$

$$V_n r_k \frac{d^2 \mathbf{R}_M}{dt^2} = m_n \mathbf{g} + \mathbf{R}_v \mathbf{n}_v + \mathbf{R}_k \mathbf{n}_k + \mathbf{N}_v f_v + \mathbf{N}_k f_k; \quad t > 0, \quad (4)$$

$$V_n r_k \frac{d^2 \mathbf{R}_M}{dt^2} = V_n r_k \mathbf{g} + \mathbf{R}_v \mathbf{n}_v (1 + f_v); \quad t > 0; \quad (5)$$

$$V_n r_k \frac{d^2 \mathbf{R}_M}{dt^2} = V_n r_k \mathbf{g} + \mathbf{R}_v \mathbf{n}_v (1 + f_v) + \mathbf{R}_k \mathbf{n}_k (1 + f_k); \quad t > 0, \quad (6)$$

де \mathbf{R}_M – миттєвий радіус-вектор положення частин коренеплодів у системі $Oxuz$ у момент часу t .

Позначимо відповідні складові векторів рівнянь (1) і (2) таким чином: миттєвий радіус-вектор положення тіла подрібнених коренеплодів у системі $Oxuz$ у момент часу t через

$$\mathbf{R}_M(t) = [x_M(t); y_M(t); z_M(t)]; \quad (7)$$

– вектор сили ваги тіла подрібнених коренеплодів згідно з [16] через

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= (V_n r_k \mathbf{g} \cos \alpha; 0; -V_n r_k \mathbf{g} \sin \alpha) = \\ &= \left(\left(\iint_{S_n} z(x, y) dx dy \right) \mathbf{r}_k \mathbf{g} \cos \alpha; 0; \right. \\ &\quad \left. - \left(\iint_{S_n} z(x, y) dx dy \right) \mathbf{r}_k \mathbf{g} \sin \alpha \right), \quad (8) \end{aligned}$$

де α – кут нахилу шнекового транспортера-подрібнювача до горизонтальної площини, град;

– вектор сили тертя ковзання тіла подрібнених коренеплодів по робочій поверхні спірального витка шнекового конвеєра

$$\mathbf{F}_{m.v} = - \left| \mathbf{N}_v \right| f_v \left| \frac{d\mathbf{R}_u}{dt} - \frac{d\mathbf{R}_M}{dt} \right| \left| \frac{d\mathbf{R}_u}{dt} - \frac{d\mathbf{R}_M}{dt} \right| =$$

$$= - \frac{\left| \mathbf{R}_v \mathbf{n}_v \right| f_v \left| \frac{d\mathbf{R}_u}{dt} - \frac{d(2p\mathbf{w}_u t + \mathbf{j}_0)}{dt} \right|}{\left| \frac{d\mathbf{R}_u}{dt} - \frac{d(2p\mathbf{w}_u t + \mathbf{j}_0)}{dt} \right|}, \quad (9)$$

при цьому $\frac{d\mathbf{R}_M}{dt} = \frac{d(2p\mathbf{w}_u t + \mathbf{j}_0)}{dt} = \mathbf{J}_v$ – вектор

швидкості руху поверхні спірального витка шнекового конвеєра у точці M у момент часу t ;

– вектор сили тертя ковзання тіла подрібнених коренеплодів по робочій внутрішній поверхні напрямної труби шнекового транспортера-подрібнювача

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{m.k} &= - \left| \mathbf{N}_k \right| f_k \left| \frac{d\mathbf{R}_u}{dt} \right| \left| \frac{d\mathbf{R}_u}{dt} \right| = \\ &= - \left| \mathbf{R}_k \mathbf{n}_k \right| f_k \left| \frac{d\mathbf{R}_u}{dt} \right| \left| \frac{d\mathbf{R}_u}{dt} \right|. \quad (10) \end{aligned}$$

Для визначення реакції в'язі R_v робочої поверхні спірального витка та реакції в'язі R_k робочої поверхні напрямної труби шнекового транспортера-подрібнювача необхідно визначити вектор одиничної нормалі \mathbf{n}_v до робочої поверхні спірального витка та вектор одиничної нормалі \mathbf{n}_k до робочої поверхні напрямної труби шнекового транспортера-подрібнювача.

Для цього запишемо рівняння поверхні шнека та поверхні напрямної труби, які згідно з [3; 4] можна задати відношеннями, відповідно:

$$\begin{aligned} \hat{S}_u(0,5D_u; \mathbf{j}_u; z) = \\ z + 0,5T_1 + (k_z - 1)\Delta T \left(\mathbf{j}_u - 2p \frac{d\mathbf{j}_u}{dt} t - \mathbf{j}_0 \right) = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \hat{S}_k(x; y; z) &= x^2 + y^2 - 0,25D_k^2 = \\ &= x^2 + y^2 - (0,5D_u + 2e)^2 = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

де D_u – діаметр шнекового конвеєра, м; D_k – внутрішній діаметр напрямної труби шнекового транспортера-подрібнювача, м; Φ_u – кут повороту шнекового конвеєра, рад; ϵ – зазор між витком і кожухом, м.

Тоді вектор одиничної нормалі \mathbf{n}_v до робочої поверхні спірального витка та вектор одиничної нормалі \mathbf{n}_k до робочої поверхні напрямної труби шнекового транспортера-подрібнювача можна записати у такому вигляді:

$$\mathbf{n}_v = \begin{bmatrix} -[T_1 + (k_z - 1)\Delta T] \sin \mathbf{j}_u; \\ [T_1 + (k_z - 1)\Delta T] \cos \mathbf{j}_u; \\ 2p R_M / a(R_M) \end{bmatrix}; \quad (13)$$

$$\mathbf{r}_{n_k} = \begin{bmatrix} -\cos\left(j_u - 2p \frac{dj_u}{dt} t - j_0\right); \\ -\sin\left(j_u - 2p \frac{dj_u}{dt} t - j_0\right); 0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$+ \frac{d[x_0(t); y_0(t); 0]}{dt}, \quad (15)$$

де a – кутовий параметр шнека.

Згідно з [9; 21]

$$a(R_M) = \sqrt{[T_1 + (k_z - 1)]^2 + 4p^2 R_M^2}.$$

З урахуванням плоскопаралельного та поступального руху шнекового конвеєра, який задано канонічним рівнянням руху центра обертання осі вала шнекового конвеєра $[x_0(t); y_0(t); z_0(t)] = [x_0(t); y_0(t); 0]$, $t \geq 0$ у площині xOy , визначаємо швидкість руху робочої поверхні спірального витка шнекового конвеєра

$$\mathbf{J}_v = \begin{pmatrix} \frac{d\left[(D_u) \cos\left(2p \frac{dj_u}{dt} t - j_0\right)\right]}{2dt}; \\ \frac{d\left[(D_u + 2e) \sin\left(2p \frac{dj_u}{dt} t - j_0\right)\right]}{2dt}; 0 \end{pmatrix}.$$

для I випадку

$$m_n \frac{d^2(0,5D_u)}{dt^2} = \begin{pmatrix} \left(\iint_{S_n} z(x, y) dx dy \right) \mathbf{r}_k g \cos a \cos j_u; 0; \\ - \left(\iint_{S_n} z(x, y) dx dy \right) \mathbf{r}_k g \sin a \sin j_u \end{pmatrix} + R_v \begin{bmatrix} -[T_1 + (k_z - 1)\Delta T] \sin f_u; [T_1 + (k_z - 1)\Delta T] \cos j_u; \\ \frac{2p R_M}{\sqrt{[T_1 + (k_z - 1)\Delta T]^2 + 4p^2 R_M^2}} \end{bmatrix} +$$

$$+ R_k \begin{bmatrix} -\cos\left(j_u - 2p \frac{dj_u}{dt} t - j_0\right); \\ -\sin\left(j_u - 2p \frac{dj_u}{dt} t - j_0\right); 0 \end{bmatrix} - \left| R_v \begin{bmatrix} -[T_1 + (k_z - 1)\Delta T] \sin j_u; [T_1 + (k_z - 1)\Delta T] \cos j_u; \\ \frac{2p R_M}{\sqrt{[T_1 + (k_z - 1)\Delta T]^2 + 4p^2 R_M^2}} \end{bmatrix} \right| \times$$

$$\frac{\frac{d(0,5D_u)}{dt} \begin{pmatrix} -2p \frac{dj_u}{dt} \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt}; \frac{dy_0(t)}{dt} + \\ + 2p \frac{dj_u}{dt} \cdot x; 0 \end{pmatrix}}{\frac{d(0,5D_u)}{dt} \begin{pmatrix} -2p \frac{dj_u}{dt} \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt}; \frac{dy_0(t)}{dt} + \\ + 2p \frac{dj_u}{dt} \cdot x; 0 \end{pmatrix}} - \left| R_k \begin{bmatrix} -\cos\left(j_u - 2p \frac{dj_u}{dt} t - j_0\right); \\ -\sin\left(j_u - 2p \frac{dj_u}{dt} t - j_0\right); 0 \end{bmatrix} \right| \frac{\frac{d(0,5D_u)}{dt}}{\frac{d(0,5D_u)}{dt}} \quad (17)$$

$$\mathbf{J}_v = \begin{pmatrix} -2p \frac{dj_u}{dt} \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt}; \frac{dy_0(t)}{dt} + 2p \frac{dj_u}{dt} \cdot x; 0 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

У рівняння (1) і (2):

– підставимо: значення діючих сил, які визначено згідно з (8) – (10); значення швидкості руху (швидкості переміщення) робочої поверхні спірального витка шнекового конвеєра, яке визначено згідно з (16);

– помножимо на скалярне значення одиничної нормалі \mathbf{n}_v та \mathbf{n}_k , які визначено згідно з (13) і (14).

Тоді отримаємо записи рівняння для I та II випадків переміщення тіла подрібнених частин коренеплодів, відповідно: коли тіло подрібнених частин коренеплодів рухається по робочій поверхні спірального витка без контакту з внутрішньою поверхнею напрямної труби; коли тіло подрібнених частин коренеплодів рухається одночасно по робочій поверхні спірального витка та внутрішній поверхні напрямної труби:

– для II випадку

$$\begin{aligned}
 m_n \frac{d^2(0,5D_w)}{dt^2} = & \left(\left(\iint_{S_n} z(x,y) dx dy \right) r_k g \cos a \cos j_w ; 0 ; \right) + R_v \left[\begin{array}{l} -[T_1 + (k_z - 1)\Delta T] \sin j_w ; [T_1 + (k_z - 1)\Delta T] \cos j_w ; \\ \frac{2pR_M}{\sqrt{[T_1 + (k_z - 1)\Delta T]^2 + 4p^2R_M^2}} \end{array} \right] + \\
 + R_k & \left[\begin{array}{l} -\cos \left(j_w - 2p \frac{df_w}{dt} t - j_0 \right) ; \\ -\sin \left(j_w - 2p \frac{df_w}{dt} t - j_0 \right) ; 0 \end{array} \right] - R_v \left[\begin{array}{l} -[T_1 + (k_z - 1)\Delta T] \sin j_w ; [T_1 + (k_z - 1)\Delta T] \cos j_w ; \\ \frac{2pR_M}{\sqrt{[T_1 + (k_z - 1)\Delta T]^2 + 4p^2R_M^2}} \end{array} \right] \times \\
 \times f_v & \left[\begin{array}{l} \frac{d(0,5D_w)}{dt} - \left(\begin{array}{l} -2p \frac{dj_w}{dt} \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt} ; \frac{dy_0(t)}{dt} + \\ + 2p \frac{dj_w}{dt} \cdot x ; 0 \end{array} \right) \\ \frac{d(0,5D_w)}{dt} - \left(\begin{array}{l} -2p \frac{dj_w}{dt} \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt} ; \frac{dy_0(t)}{dt} + \\ + 2p \frac{dj_w}{dt} \cdot x ; 0 \end{array} \right) \end{array} \right] \left[\begin{array}{l} -\cos \left(j_w - 2p \frac{dj_w}{dt} t - j_0 \right) ; \\ -\sin \left(j_w - 2p \frac{dj_w}{dt} t - j_0 \right) ; 0 \end{array} \right] \left[\begin{array}{l} \frac{d(0,5D_w)}{dt} \\ \frac{d(0,5D_w)}{dt} \end{array} \right] \cdot
 \end{aligned} \quad (18)$$

При цьому згідно з рівняннями (5) і (6) записи рівняння для I та II випадків переміщення тіла подрібнених частин коренеплідів матимуть вигляд, відповідно:

$$\begin{aligned}
 \left(\iint_{S_n} z(x,y) dx dy \right) r_k \frac{D_w}{2} \left(\frac{dj_w}{dt} \right)^2 = & \left(\left(\iint_{S_n} z(x,y) dx dy \right) r_k g \cos a \cos j_w ; 0 ; - \left(\iint_{S_n} z(x,y) dx dy \right) r_k g \sin a \sin j_w \right) + \\
 + R_v & \left[\begin{array}{l} -[T_1 + (k_z - 1)\Delta T] \sin j_w ; \\ [T_1 + (k_z - 1)\Delta T] \cos j_w ; \\ \frac{2pR_M}{\sqrt{[T_1 + (k_z - 1)\Delta T]^2 + 4p^2R_M^2}} \end{array} \right] \times \left(1 - f_v \left[\begin{array}{l} \frac{d(0,5D_w)}{dt} - \left(\begin{array}{l} -2p \frac{dj_w}{dt} \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt} ; \\ \frac{dy_0(t)}{dt} + 2p \frac{dj_w}{dt} \cdot x ; 0 \end{array} \right) \\ \frac{d(0,5D_w)}{dt} - \left(\begin{array}{l} -2p \frac{dj_w}{dt} \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt} ; \\ \frac{dy_0(t)}{dt} + 2p \frac{dj_w}{dt} \cdot x ; 0 \end{array} \right) \end{array} \right] \right);
 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
 \left(\iint_{S_n} z(x,y) dx dy \right) r_k \frac{D_w}{2} \left(\frac{dj_w}{dt} \right)^2 = & \left(\left(\iint_{S_n} z(x,y) dx dy \right) r_k g \cos a \sin f_w ; 0 ; - \left(\iint_{S_n} z(x,y) dx dy \right) r_k g \sin a \sin f_w \right) + \\
 + R_v & \left[\begin{array}{l} -[T_1 + (k_z - 1)\Delta T] \sin j_w ; \\ [T_1 + (k_z - 1)\Delta T] \cos j_w ; \\ \frac{2pR_M}{\sqrt{[T_1 + (k_z - 1)\Delta T]^2 + 4p^2R_M^2}} \end{array} \right] \times \left(1 - f_v \left[\begin{array}{l} \frac{dD_w}{2dt} - \left(\begin{array}{l} -2p \frac{dj_w}{dt} \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt} ; \\ \frac{dy_0(t)}{dt} + 2p \frac{dj_w}{dt} \cdot x ; 0 \end{array} \right) \\ \frac{dD_w}{2dt} - \left(\begin{array}{l} -2p \frac{dj_w}{dt} \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt} ; \\ \frac{dy_0(t)}{dt} + 2p \frac{dj_w}{dt} \cdot x ; 0 \end{array} \right) \end{array} \right] - \right. \\
 - R_k & \left[\begin{array}{l} -\cos \left(f_w - 2p \frac{dj_w}{dt} t - j_0 \right) ; \\ -\sin \left(j_w - 2p \frac{dj_w}{dt} t - j_0 \right) ; 0 \end{array} \right] \left(1 - f_k \left| \frac{dD_w / 2dt}{dD_w / 2dt} \right| \right)
 \end{aligned} \quad (20)$$

Із рівнянь (20), (21) знаходимо реакцію в'язі R_v робочої поверхні спірального витка та реакцію в'язі R_k робочої поверхні напрямної труби шнекового транспортера-подрібнювача:

$$R_v = \frac{\left(\iint_{S_n} z(x, y) dx dy \right) r_k R_M \left(\frac{dj_u}{dt} \right)^2 - \begin{pmatrix} \left(\iint_{S_n} z(x, y) dx dy \right) r_k g \cos a; \\ 0; - \left(\iint_{S_n} z(x, y) dx dy \right) r_k g \sin a \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} -[T_1 + (k_z - 1)\Delta T] \sin j_u; \\ [T_1 + (k_z - 1)\Delta T] \cos j_u; \\ \frac{2pR_M}{\sqrt{[T_1 + (k_z - 1)\Delta T]^2 + 4p^2 R_M^2}} \end{pmatrix}} \times \left(1 - f_v \frac{\begin{pmatrix} \frac{dR_u}{dt} - \left(\frac{-2p \frac{dj_u}{dt} \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt}}{\frac{dy_0(t)}{dt} + 2p \frac{dj_u}{dt} \cdot x; 0 \right)} \\ \frac{dR_u}{dt} - \left(\frac{-2p \frac{dj_u}{dt} \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt}}{\frac{dy_0(t)}{dt} + 2p \frac{dj_u}{dt} \cdot x; 0 \right)} \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} \frac{dR_u}{dt} - \left(\frac{-2p \frac{dj_u}{dt} \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt}}{\frac{dy_0(t)}{dt} + 2p \frac{dj_u}{dt} \cdot x; 0 \right)} \\ \frac{dR_u}{dt} - \left(\frac{-2p \frac{dj_u}{dt} \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt}}{\frac{dy_0(t)}{dt} + 2p \frac{dj_u}{dt} \cdot x; 0 \right)} \end{pmatrix}} \right); \quad (21)$$

$$R_k = \frac{\begin{pmatrix} -\cos \left(j_u - 2p \frac{dj_u}{dt} t - j_0 \right); \\ -\sin \left(j_u - 2p \frac{dj_u}{dt} t - j_0 \right); 0 \end{pmatrix} \times \left(1 - f_k \frac{\begin{pmatrix} \left| \frac{dD_u}{2dt} \right| \\ \left| \frac{dD_u}{2dt} \right| \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} \left| \frac{dD_u}{2dt} \right| \\ \left| \frac{dD_u}{2dt} \right| \end{pmatrix}} \right)}{\left(\iint_{S_n} z(x, y) dx dy \right) r_k \frac{D_u}{2} \left(\frac{dj_u}{dt} \right)^2 - \begin{pmatrix} \left(\iint_{S_n} z(x, y) dx dy \right) r_k g \cos a \sin j_u; 0; \\ - \left(\iint_{S_n} z(x, y) dx dy \right) r_k g \sin a \sin j_u \end{pmatrix}} + R_v \frac{\begin{pmatrix} -[T_1 + (k_z - 1)\Delta T] \sin f_u; \\ [T_1 + (k_z - 1)\Delta T] \cos f_u; \\ \frac{2pR_M}{\sqrt{[T_1 + (k_z - 1)\Delta T]^2 + 4p^2 R_M^2}} \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} -[T_1 + (k_z - 1)\Delta T] \sin f_u; \\ [T_1 + (k_z - 1)\Delta T] \cos f_u; \\ \frac{2pR_M}{\sqrt{[T_1 + (k_z - 1)\Delta T]^2 + 4p^2 R_M^2}} \end{pmatrix}} \times \left(1 - f_v \frac{\begin{pmatrix} \frac{dD_u}{2dt} - \left(\frac{-2p \frac{df_u}{dt} \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt}}{\frac{dy_0(t)}{dt} + 2p \frac{df_u}{dt} \cdot x; 0 \right)} \\ \frac{dD_u}{2dt} - \left(\frac{-2p \frac{df_u}{dt} \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt}}{\frac{dy_0(t)}{dt} + 2p \frac{df_u}{dt} \cdot x; 0 \right)} \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} \frac{dD_u}{2dt} - \left(\frac{-2p \frac{df_u}{dt} \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt}}{\frac{dy_0(t)}{dt} + 2p \frac{df_u}{dt} \cdot x; 0 \right)} \\ \frac{dD_u}{2dt} - \left(\frac{-2p \frac{df_u}{dt} \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt}}{\frac{dy_0(t)}{dt} + 2p \frac{df_u}{dt} \cdot x; 0 \right)} \end{pmatrix}} \right). \quad (22)$$

Підставивши значення реакції в'язі R_v робочої поверхні спірального витка із рівнянь (20) та реакції в'язі R_k робочої поверхні напрямної труби із рівняння (21) у рівняння руху (5) і (6), отримаємо математичні моделі динамічного процесу переміщення тіла подрібнених коренеплодів робочими органами шнекового транспортера-подрібнювача для I та II випадків:

$$m_k T_k \frac{d^2 j_u}{dt^2} = m_k g \sin a - \frac{\begin{pmatrix} m_k R_M \left(\frac{dj_u}{dt} \right)^2 - (m_k g \cos a; 0; -m_k g \sin a) \end{pmatrix} (1 + f_v)}{\begin{pmatrix} -T_k \sin j_u; T_k \cos j_u; \frac{2pR_M}{\sqrt{T_k^2 + 4p^2 R_M^2}} \end{pmatrix} \times \left(1 - f_v \frac{\begin{pmatrix} |j_u - 2pw_u \cdot y + j_0| \\ \left| \frac{dR_M}{2dt} - 2pw_u \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt} \right| \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} \left| \frac{dR_M}{2dt} - 2pw_u \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt} \right| \\ \left| \frac{dR_M}{2dt} - 2pw_u \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt} \right| \end{pmatrix}} \right)}; \quad (23)$$

$$m_k T_k \frac{d^2 j_u}{dt^2} = m_k g \sin a - \frac{\begin{pmatrix} m_k R_M \left(\frac{dj_u}{dt} \right)^2 - (m_k g \cos a; 0; -m_k g \sin a) \end{pmatrix} (1 + f_v)}{\begin{pmatrix} -T_k \sin j_u; T_k \cos j_u; \frac{2pR_M}{\sqrt{T_k^2 + 4p^2 R_M^2}} \end{pmatrix} \times \left(1 - f_v \frac{\begin{pmatrix} |j_u - 2pw_u \cdot y + j_0| \\ \left| \frac{dR_M}{2dt} - 2pw_u \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt} \right| \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} \left| \frac{dR_M}{2dt} - 2pw_u \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt} \right| \\ \left| \frac{dR_M}{2dt} - 2pw_u \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt} \right| \end{pmatrix}} \right)}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[-\cos\left(j_u - 2p \frac{dj_u}{dt} t - j_0\right); -\sin\left(j_u - 2p \frac{dj_u}{dt} t - j_0\right); 0 \right] \times \left(1 - f_k \frac{\left| \frac{dD_u}{2dt} \right|}{\left| \frac{dD_u}{2dt} \right|} \right) (1 + f_k) \\
 & \frac{m_k \frac{D_u}{2} \left(\frac{dj_u}{dt} \right)^2 - (m_k g \cos a \sin j_u; 0; -m_k g \sin a \sin j_u) +}{+} \\
 & \frac{\left[m_k R_M \left(\frac{dj_u}{dt} \right)^2 - (m_k g \cos a; 0; -m_k g \sin a) \right]}{\left[-T_k \sin j_u; T_k \cos j_u; \frac{2p R_M}{\sqrt{T_k^2 + 4p^2 R_M^2}} \right]} \times \left(1 - f_v \frac{\left| j_u - 2pw_u y + j_u \right|}{\left| \frac{dR_M}{2dt} - 2pw_u \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt} \right|} \right) \cdot (24) \\
 & \times \left[-T_k \sin j_u; T_k \cos j_u; \frac{2p R_M}{\sqrt{T_k^2 + 4p^2 R_M^2}} \right] \times \left(1 - f_v \frac{\left| j_u - 2pw_u \frac{dj_u}{dt} \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt} \right|}{\left| \frac{dD_u}{2dt} - \left(\frac{-2p \frac{dj_u}{dt} \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt}}{\frac{dy_0(t)}{dt} + 2p \frac{dj_u}{dt} \cdot x; 0} \right) \right|} \right) \\
 & \left(\frac{dD_u}{2dt} - \left(\frac{-2p \frac{dj_u}{dt} \cdot y + \frac{dx_0(t)}{dt}}{\frac{dy_0(t)}{dt} + 2p \frac{dj_u}{dt} \cdot x; 0} \right) \right)
 \end{aligned}$$

Висновки. Таким чином, отримані аналітичні значення реакції в'язі R_v робочої поверхні спірального витка (21) та реакції в'язі R_k робочої поверхні напрямної труби шнекового конвеєра (22) та рівняння руху тіла подрібнених коренеплодів (23) і (24) для I і II випадків переміщення подрібнених частин коренеплодів є основою для подальшого проведення аналітичних розрахунків з метою обґрунтування та оптимізації основних конструктивно-кінематичних параметрів і режимів роботи робочих органів транспортера-подрібнювача.

Для повного опису процесу роботи шнекового транспортера-подрібнювача математичну модель динамічного процесу переміщення подрібнених частин шнековим конвеєром (21) – (24) необхідно доповнити початковими умовами:

$$j(0) = j_u; \quad \frac{dj(0)}{dt} = j_0.$$

Необхідно також зазначити, що математична модель (21) – (24) адекватна тільки за умови, що $R_v > 0$ і $R_k > 0$. При цьому у випадку $R_v < 0$ і $R_k < 0$ тіло подрібнених коренеплодів втрачає контакт з поверхнями і рівняння (5) і (6) вже не описують процесу руху (переміщення).

Бібліографічний список

1. Барановський В. М. Основні етапи та сучасні тенденції розвитку коренезбиральних машин. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2006. Т. 11, № 2. С. 67–75.
2. Барановський В. М., Підгурський М. І., Паньків М. Р. Методологічні та конструктивно-технологічні аспекти розробки адаптованих коренезбиральних машин. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2014. Т. 2 (74). С. 106–113.
3. Беляничков М. М., Смирнов А. І. Механізація тваринництва. Київ: Вища шк., 1980. 375 с.
4. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. 706 с.
5. Булгаков В. М., Черновол М. И., Свирень Н. А. Теория свеклоуборочных машин: монография. Кировоград: КОД, 2009. 256 с.
6. Гевко І. Б. Гвинтові транспортно-технологічні механізми: розрахунок і конструювання. Тернопіль: ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008. 307 с.
7. Гевко І., Рогатинський Р., Дячун А. Синтез змішувачів з гвинтовими робочими органами. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2012. № 16. С. 237–246.
8. Гевко І. Б. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Львів, 2013. 40 с.

9. Горбунов В. Ф., Кобылянский Д. М. Обзор современного состояния теории транспортирования горной массы винтовыми конвейерами. *Вестник РАН (ЗСО)*. 2006. № 8. С. 171–177.
10. Дубровин В., Голуб Г., Теслюк В., Барановский В. Идентификация процесса разработки адаптированной корнеуборочной машины. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery*. 2013. Vol. 15, № 3. С. 243–255.
11. Красников В. В. Подъемно-транспортные машины в сельском хозяйстве. Москва: Колос, 1973. 464 с.
12. Ловейкін В. С., Рогатинська О. Р. До розрахунку швидкохідних гвинтових конвеєрів. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. Вип. 21. 2004. С. 130–141.
13. Любін М. В. Підйомно-транспортні машини. Швидкохідні гвинтові конвеєри. Вінниця: ВЦ ВДАУ, 2005. 36 с.
14. Основи перспективних технологій виробництва продукції тваринництва / [Г. М. Калетник, М. Ф. Кулик, В. Ф. Петриченко та ін.]; під ред. Г. М. Калетника, М. Ф. Кулика, В. Ф. Петриченка, В. Д. Хорішка. Вінниця: Енозіс, 2007. 584 с.
15. Паньків В. Р. Комбинированный транспортер-измельчитель. *Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве. Аграрная наука – сельскохозяйственному производству Сибири, Казахстана, Монголии, Беларуси и Болгарии*: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 19–21 окт. 2016 г. Минск: НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2016. Т. 1. С. 111–115.
16. Погорелый Л. В., Татьяна М. В. Свеклоуборочные машины: история, конструкция, теория, прогноз. Киев: Феникс, 2004. 232 с.
17. Рогатинський Р. М. Механіко-технологічні основи взаємодії шнекових робочих органів із сировиною сільськогосподарського виробництва: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Київ, 1997. 52 с.
18. Рогатинський Р. М. Моделювання процесів взаємодії шнекових робочих органів із коренебульбоплодами. *Науковий вісник Національного аграрного університету*. 1997. Т. 1. С. 103–108.
19. Рогатинський Р., Гевко І. Модель конструювання і вибору гвинтових конвеєрів з розширеними технологічними можливостями. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2012. № 3 (67). С. 197–210.
20. Рогатинський Р., Гевко І., Рогатинська Л. Оптимізація параметрів гвинтових транспортно-технологічних систем. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2013. № 1 (69). С. 123–230.
21. Сторожук І. М. Обґрунтування конструктивно-кінематичних параметрів шнекового конвеєра гнчкозбирального модуля. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. 2016. Вип. 251. С. 323–333.
22. Теслюк В. В., Барановський В. М., Теслюк В. В. Концептуальні основи біотехнології виробництва мікобіопрепаратів із плодів грибів. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. 2016. Вип. 241. С. 26–31.
23. Часов Д. П. Визначення рівняння поверхні додаткової лопаті шнекового конвеєру. *Восточно-Европейський журнал передових технологій*. 2016. № 5/1 (83). С. 45–50.
24. Hevko R. B., Dzyura V. O., Romanovsky R. M. Mathematical model of the pneumatic-screw conveyor screw mechanism operation. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2014. Vol. 44, No. 3. P. 103–110.
25. Hevko R. B., Klendiy O. M. The investigation of the process of a screw conveyor safety device actuation. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2014. Vol. 42, No. 1. P. 55–60.
26. Hevko R. B., Klendiy M. B., Klendiy O. M. Investigation of a transfer branch of a flexible screw conveyor. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 48, No. 1/2016. P. 29–34.
27. Pankiv V. R., Tokarchuk O. A. Investigation of constructive geometrical and filling coefficients of combined grinding screw conveyor. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 51, No. 1/2017. P. 59–68.
28. Pankiv V. Throughput capability of the combined screw chopper conveyor. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2017. № 1 (85). С. 69–79.

Грицай Ю.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ПЕРЕМІЩЕННЯ ПОДРІБНЕНИХ КОРЕНЕПЛОДІВ ШНЕКОВИМ ТРАНСПОРТЕРОМ-ПОДРІБНЮВАЧЕМ

Шнекові транспортери широко застосовуються в аграрній сфері виробництва для переміщення, змішування, дозування продуктів тощо. Удосконалення існуючих конструкцій шнекових транспортерів та обґрунтуванням їх раціональних параметрів і режимів роботи є актуальним науковим завданням. Метою дослідження є розширення функціональних технологічних можливостей шнекових транспортерів шляхом розробки комбінованих робочих органів, які забезпечують одночасне подрібнення та переміщення коренеплодів у процесі їх підготовки та переробки на соковиті корми. Основними завданнями досліджень, які забезпечують реалізацію сформульованої мети, є обґрунтуванням параметрів комбінованого робочого органу шнекового транспортера-подрібнювача за умови зменшення енерговитрат процесу роботи технічних засобів,

які застосовуються на технологічних лініях переробки коренеплодів. На основі аналізу існуючої узагальненої структурної схеми операції переробки коренеплодів на корм тваринам висунуто наукову гіпотезу про можливість поєднання двох суміжних технологічних операцій, які виконуються окремими механізмами (подрібнення коренеплодів коренерізкою та транспортування подрібнених коренеплодів до змішувачів-запарників транспортером), в одну суцільну технологічну операцію «подрібнення + транспортування», яку реалізує один технічний засіб – шнековий транспортер з комбінованим робочим органом. Отримано математичну модель динамічного процесу переміщення подрібнених частин коренеплодів робочими органами шнекового транспортера-подрібнювача. Результати досліджень є подальшим кроком з розробки методики обґрунтування параметрів шнекових механізмів.

Ключові слова: шнековий конвеєр, спіральний виток, напрямна труба, кутова швидкість, рівняння руху, одинична нормаль, вектор.

Hrytsay Yu.

MATHEMATICAL MODEL OF PROCESS OF MOVING OF THE GROUND UP ROOT CROPS SCREW CONVEYER-GRINDING

Screw conveyors are used in various sectors of the national economy – heavy industry, construction, agricultural production, etc. They are intended for the transfer of various bulk and artificial materials. In the agrarian sector, as a rule, screw conveyors are used. They are intended for moving in the horizontal, sloping and vertical directions of products of agrarian production, for example, root crops, potatoes, grains, fodder mixtures, mineral and organic fertilizers, etc. On the basis of their design features, they can simultaneously perform adjacent operations and functions – mixing products, dispensing materials, separating impurities, etc. In the general pattern of production of goods of stock-raising to 50,70 % all charges are on preparation part of forage. These charges can be substantially decreased, if production, or processing of products on fodder to conduct not in the specialized plants, but directly in economic enterprises, using here own raw material and minimizing transport charges. Development of high-efficiency technological processes of the simultaneous growing and moving shallow, both single cobbled and requires the friable products of agar production the integrated scientific going near the decision of technical task of increase of technological indexes of work and expansion of technological possibilities of the screw conveyers-grinding down. A research aim is an increase (expansion) of technological possibilities of screw conveyers by development of the combined working organs that provide the simultaneous growing and moving of root crops shallow in the process of their preparation and processing on rich fodders. The basic tasks of researches, that provide realization of the set forth aim, are grounds of parameters of the combined working organ of the screw conveyer-grinding down. On the basis of analysis of the existent generalized flow diagram of operations of processing of root crops on fodder to the animals by us a scientific hypothesis was pulled out about possibility of combination two contiguous technological operations that is executed by separate mechanisms (growing of root crops and transporting of the ground up parts of root crops shallow to the mixers-steamers by a conveyer belt) in one continuous (incorporated) technological operation of the simultaneous «growing + of transporting» shallow. This united technological operation one spiral hardware – screw conveyer can realize with the combined working organ.

The got analytical values of force of reaction of working surface of spiral coil and force of reaction of working surface of directing pipe of screw conveyer and equalization of motion of parts of the ground up root crops are basis for further realization of analytical calculations with the aim of ground and optimization of basic structurally-kinematics parameters and modes of operations of working organs of conveyer-grinding down.

Key words: screw conveyer, spiral coil, directing pipe, angulator, equalization of motion, single normal, vector.

Стаття надійшла 15.11.2018