

І.В. Карп

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ
В ПНЕВМОШНЕКОВОМУ ТРАНСПОРТЕРІ**

На основі аналізу графічних побудов встановлено, що кут відхилення частинки зернового матеріалу під час її руху по спіральному витку шнека змінюється в діапазоні 0...72 градуси, причому залежно від збільшення діаметра та кроку шнека відхилення частинки при зміні кута в межах 45...72 градуси має прямий характер, а в діапазоні 0...45 градусів – зворотний характер. Отримані диференційні залежності можуть бути використані для подальшого обґрунтування конструктивних та кінематичних параметрів пневмошнекових транспортних механізмів.

Ключові слова: шнековий живильник, спіральний виток, рівняння руху, кутова швидкість, кут повороту, вектор, сила, коефіцієнт, модель, параметри.

I. Karp

**MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF GRAIN MATERIAL
TRANSPORTATION IN A PNEUMATIC CONVEYOR**

For the movement of grain materials during their post-harvest processing, pneumatic screw conveyors are used, which ensure the movement of grain over considerable distances. The results of the analysis of kinematic-dynamic processes are presented, which are characteristic of two possible cases of complex movement or movement of grain material particles along the surface of the spiral turn of the screw conveyor - in the absence of oscillatory processes of the screw drum and in the presence of screw vibration. Based on the analysis of graphic constructions, it was established that the angle of deviation of a grain material particle during its movement along the spiral turn of the screw varies in the range of 0...72 degrees, and depending on the increase in the diameter and pitch of the screw, the deviation of the particle when changing the angle within 45...72 degrees has a direct character, i.e. increases, and in the range of 0...45 degrees - an inverse character, i.e. decreases. The obtained differential dependencies or mathematical models can be used to further substantiate the structural and kinematic parameters of pneumatic screw transport mechanisms.

Key words: screw feeder, spiral turn, equation of motion, angular velocity, angle of rotation, vector, force, coefficient, model, parameters.

Постановка проблеми. Шнекові конвеєри (ШК), як окремий технічний елемент транспортних механізмів застосовуються в компоновальних схемах транспортних машин для переміщення зернових матеріалів завдяки простій конструкції та забезпечення їх доставки в будь-яку технологічну точку транспортної лінії [1-3].

На токах великих сільськогосподарських підприємств для транспортування зернових матеріалів широко застосовують пневмотранспортні установки продуктивністю 50...200 т/год, за допомогою яких матеріали переміщуються на відстань до 100 м зі швидкістю 15...40 м/с стисненого до 0,6...0,8 МПа повітря [4, 5].

Застосування такого обладнання в невеликих господарствах є економічно не вигідним через виконання невеликого обсягу транспортних робіт і, відповідно, незначну рентабельність використання таких складних і дорогих в обслуговуванні пневмотранспортних механізмів [6, 7].

Загальним недоліком роботи шнекових механізмів є те, що спіральні витки виконують не тільки повздовжній осьовий рух матеріалу, але й призводять до обертання частинок зерна, під час якого матеріал переміщується по поверхні спірального витка навколо осі шнека.

Це призводить до пошкодження матеріалу, зниження продуктивності таких механізмів та значного збільшення потужності, необхідної для здійснення процесу переміщення зернових матеріалів по трасі на задану віддадь [8-10].

Таким чином, серед актуальних завдань підйомно-транспортної галузі, важливим завданням є розробка та обґрунтування раціональних параметрів мобільних малогабаритних шнекових пневмотранспортерів, які забезпечують ефективні технологічні процеси переміщення зернових матеріалів за технологічними маршрутами різної просторової конфігурації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових робіт [13-17] показав, що основна увага авторів була приділена реалізації стаціонарних процесів транспортування фізичних тіл ШК без дослідження процесів, які описують на теоретичному рівні вібрацію матеріалів, яка виникає під час їх переміщення витками шнека.

Тому вибір методики та розрахунок раціональних параметрів робочих органів пневмошнекового транспортера необхідно здійснювати на основі реалізації моделей безпосередньої кінематично-динамічної взаємодії відповідної робочої поверхні із зерновим матеріалом і урахування його фізико-механічних характеристик. Крім того, на основі відомих результатів встановлено, що існуючі конструкції робочих органів ШК не в повній мірі задовольняють функціональні вимоги до показників пошкодження зерна при забезпеченні мінімальних енерговитрат на здійснення технологічного процесу його переміщення по трасах транспортування [18, 19].

Постановка завдань. Метою роботи є дослідження процесу переміщення насіння зернових культур спіральними витками ШК з розроблення математичної моделі, яка описує функціональні зв'язки вібраційних процесів і кінематично-динамічного руху зерна у просторі прямої труби пневмошнекового конвеєра.

Викладення основного матеріалу. Розроблену схему малогабаритного пневмошнекового транспортера для переміщення зернових матеріалів на токах малих фермерських підприємств за маршрутами різної конфігурації наведено на рис. 1 [11, 12].

Пневмошнековий транспортер складається з бункера 1, який закріплений до прямої труби 5, всередині якої встановлено шнек 2 та які у комбінації утворюють ШК. За вихідним кінцем шнека у стінці кожуха закріплено штуцери 3 пневмолінії, а за ними встановлено змінні сопла або насадки з отворами. Подача повітря відбувається за допомогою пневморозподільника 4, що забезпечує в автоматичному режимі подачу стисненого повітря від компресора по шлангах, які надіті на відповідні штуцери 3. До кожуха закріплено гнучкий пневмопровід (рукав) по якому надалі транспортується зерно до місця призначення.

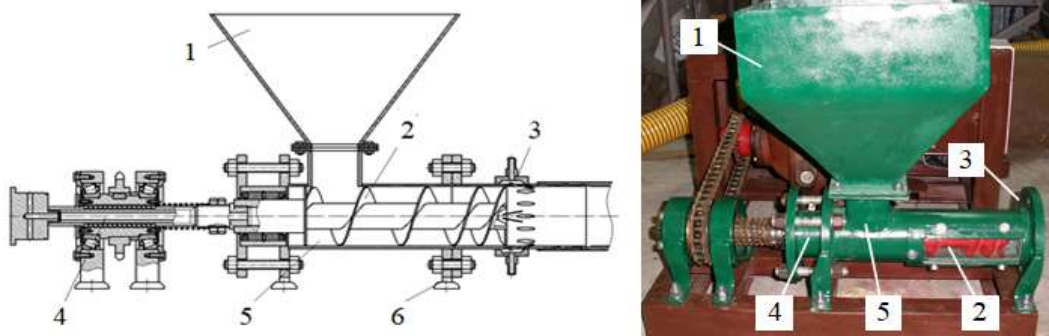


Рис. 1. Конструктивна схема пневмошнекового транспортера: 1 – бункер; 2 – шнек; 3 – штуцер пневмолінії; 4 – пневморозподільник; 5 – пряма труба (кожух); 6 – з'єднувальні фланці

Автоматичне регулювання подачею стиснутого повітря до пневмопроводу через шланги 6 (рис. 2) забезпечується пневморозподільником, який має механізм регулювання подачі повітря у шланги 6. Шліцьовий вал шнека з'єднаний із шліцьовим валом 3, встановленого у корпус 2 через кульки з можливістю осевого зміщення при збільшенні навантаження на витки шнека.

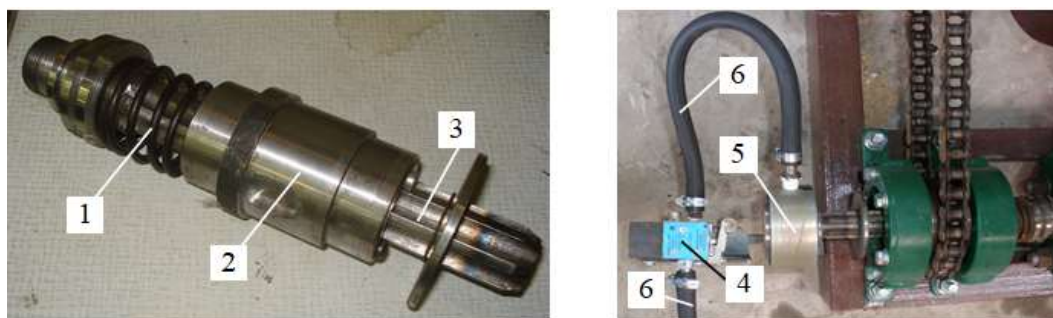


Рис. 2. Загальний вигляд механізму пневморозподільника: 1 – натискна пружина; 2 – корпус; 3 – шліцьовий вал з напівкруглими пазами; 4 – пневморозподільник; 5 – поворотний пневматичний адаптер; 6 – шланг

Механізм автоматичного регулювання процесом роботи пневморозподільника дозволяє визначати крутний момент на валу привода шнека, та регулює роботу пневмошнекового

транспортера шляхом вмикання або вимикання пневморозподільник залежно від наявного навантаження на спіральні витки шнека.

На етапі оптимізації параметрів транспортно-технічних систем, які мають робочі елементи шнекових механізмів та їх проектування доцільно спочатку побудувати математичну модель технологічного процесу роботи ШК. Це дозволить отримати теоретичні закономірності, які на аналітичному рівні описують функціональні взаємозв'язки параметрів ШК та зернового матеріалу на стадії його переміщення в просторі кожуха та обґрунтувати раціональні режими роботи ШК залежно від умов переміщення та його основних конструктивно-кінематичних параметрів [20].

Для розробки математичної моделі технологічного процесу роботи ШК розглянемо рух матеріальної частинки (зернини) суцільного нерозривного потоку зернового середовища, яка знаходиться на поверхні спірального витка 1 (рис. 3) шнека 2. Шнек встановлено консольно з зазором відносно корпусу 3 а зернина переміщується горизонтально вздовж осі обертання шнека з поступальною швидкістю в напрямку пневмопровода пневмошнекового транспортера.

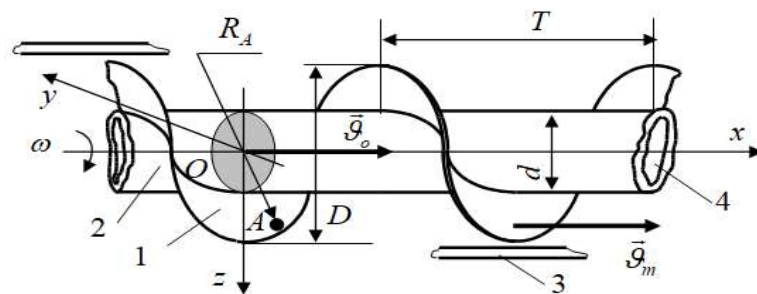


Рис. 3. Схема до розрахунку руху зернового матеріалу у шнековому конвєєрі:
1 – спіральний виток шнека; 2 – шнек; 3 – корпус (кожух); 4 – барабан

З початком контакту частинки тіла (зернини) масою m_c з поверхнею спірального витка 1 (рис. 3), вона за рахунок обертання спірального витка шнека 2 з кутовою швидкістю ω одночасно обертається навколо поперечної осі Oz та переміщується по поверхні витка в напрямку поздовжньої осі Oz . У процесі руху по спіральному витку шнека в напрямку вектора $\vec{g}_m$ осьового переміщення або в напрямку вектора $\vec{g}_o$ осьової поступальної швидкості, зернина також може одночасно ковзати по поверхні спірального витка та корпусу 3 ШК протягом деякого інтервалу часу Δt .

У цьому випадку маємо складний рух фізичного тіла, коли зернина бере участь: у відносному (обертальному) русі – по поверхні спірального витка ШК зі швидкістю $\vec{g}_{1c}$; при поступальному русі – одночасно разом з поворотом зернини зі швидкістю $\vec{g}_{2c}$ і горизонтального руху в напрямку вектора $\vec{g}_m$.

На матеріальне тіло, тобто зернину масою m_c , яка знаходиться на поверхні витка ШК та переміщується по ньому, в момент часу $t = 0$ діють сила тяжіння $m_c g$, сила реакції поверхні витка N_1 та кожуха N_2 , сила тертя ковзання витка F_1 та кожуха F_2 .

Введемо нерухому просторову систему координат $Oxyz$ (рис. 3), в якій вісь Oz збігається з віссю обертання ШК, а вісь Ox – з поздовжньою віссю обертання ШК або розташована паралельно горизонтальній площині.

За проміжок часу Δt , або в момент часу t , спіральний виток 1 (рис. 3) ШК повернеться на кут повороту $\varphi(t)$, а кут повороту $\varphi(t)$ спірального витка згідно з [21] виражається залежністю

$$\varphi(t) = 2\pi\omega t + \varphi_1 = 2\pi \frac{d\varphi}{dt} + \varphi_1, \quad (1)$$

де ω – кутова швидкість обертання шнека, рад/с; $\varphi_1 = const$ – початковий кут повороту шнека в момент часу $t = 0$, рад.

Згідно з [22], поряд з обертальним рухом частинки матеріалу масою m_c , яка розташована на поверхні спірального витка 1 (рис. 3) ШК, здійснює деякий рух за рахунок плоскопаралельного руху в площині zOy , яка перпендикулярна осі обертання барабана 4 шнека 2, тобто осі Ox вала шнека.

При $x = 0$, цей рух частинки матеріалу масою m_c можна описати канонічним рівнянням руху центру O осі вала ШК, тобто $[z_0(t); y_0(t); x_0(t)] = [z_0(t); y_0(t); 0], t \geq 0$, де координати z_0 і y_0 згідно з [23] можна записати у вигляді $z_0(t) = -f[\varphi_0(t)\cos\varphi_A(t)] + g[\varphi_0(t)\sin\varphi_0(t)]$ та у вигляді $y_0(t) = -f[\varphi_A(t)\sin\varphi_A(t)] - g[\varphi_A(t)\cos\varphi_0(t)]$.

Рівняння руху частинки матеріалу масою m_c в нерухомій системі координат Oxy згідно з класичними законами механіки [23] у векторній формі має вигляд

$$m_c \ddot{\vec{x}}_i = m_c \vec{a}_c = m_c \frac{d^2 \vec{R}_A}{dt^2} = \vec{G}_{m_c} + \sum_{i=1}^2 \vec{N}_{n_i} + \sum_{i=1}^2 \vec{F}_{m_i}, \quad t > 0, \quad (2)$$

де компоненти залежності (2), тобто бігучий вектор $\vec{R}_A$ положення частинки в площині zOy , або зв'язок між векторним і координатним режимами руху частинки, векторний запис сили тяжіння частинки $\vec{G}_{m_c}$, векторне значення сумарної реакції $\sum_{i=1}^2 \vec{N}_i$ поверхонь і сумарної сили тертя ковзання

$\sum_{i=1}^2 \vec{F}_{m_i}$ частинки по поверхнях визначаються як:

$$\vec{R}_A(t) = [x_A(t); y_A(t); z_A(t)] = ix(t) + jy(t) + kz(t); \quad \vec{G}_{m_c} = (m_c g; 0; -m_c g); \quad \vec{N}_i = \vec{n}_i \mu_i, \quad (3)$$

де i, j, k – координати відповідних осей системи координат; $\vec{n}_i$ – одиничний вектор, перпендикулярний до площини відповідної поверхні P_i , або одинична нормаль до поверхні P_i , $i = 1, 2$;

$$\vec{F}_{m_i} = -f_i m_c \vec{a}_{c_i} = -f_i |\vec{N}_i| \left| \left(\frac{\dot{\vec{R}}_A}{V_i} - \vec{V}_i \right) / \left| \frac{\dot{\vec{R}}_A}{V_i} - \vec{V}_i \right| \right| = -f_i |\vec{N}_i| \left| \left(\frac{d\vec{R}_A}{dt} - \vec{V}_i \right) / \left| \frac{d\vec{R}_A}{dt} - \vec{V}_i \right| \right|, \quad (4)$$

де μ_i – реакція в'язі відповідної площини; f_i – коефіцієнт тертя ковзання поверхні; V_i – швидкість руху матеріальної частинки масою m_c вздовж поверхні P_i в точці $\vec{R}_A(t)$.

Розв'язання задачі зводиться до знаходження реакцій в'язі μ_i відповідної поверхні площини P_i , або в нашому випадку – до знаходження μ_1 і μ_2 – відповідно, реакцій в'язі поверхні спірального витка 1 шнека 2 і поверхні корпусу 3 ШК.

Для цього спочатку запишемо рівняння поверхні P_1 спірального витка 1 шнека 2 та поверхні P_2 кожуха 3, які згідно з [24] мають вигляд

$$\left. \begin{aligned} P_1(0,5D; R; \varphi; x) &\equiv x + (T/2\pi)(\varphi - \varphi_0) = 0; \\ P_2(x; y; z) &\equiv z^2 + y^2 - 0,25D^2 = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

де D – діаметр шнека, м; T – крок гвинтової лінії шнека, м.

Тоді положення одиничних векторів $\vec{n}_1$ і $\vec{n}_2$, які перпендикулярні до площин відповідних контактних поверхонь частинок матеріалу, будуть визначатися як

$$\left. \begin{aligned} \vec{n}_1 &= (-T \sin \varphi; T \cos \varphi; \pi D / c(0,5D)); \\ \vec{n}_2 &= (-\cos \varphi; \sin \varphi; 0) \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

де $c(0,5D) = \sqrt{T^2 + \pi^2 D^2} = \pi D \sqrt{\tan^2 \beta + 1}$ – параметр шнека; $T = \pi D \tan \beta$, β – кут підйому гвинтової лінії витків спіралі шнека, град.

Враховуючи канонічне рівняння (1) обертання ШК і поступальний рух частинки, отримуємо

$$\vec{g}_1 = \frac{d}{dt} [0,5D \cos \varphi_o(t); 0,5D \sin \varphi_o(t); 0] + \frac{d}{dt} [z_o(t); y_o(t); 0], \quad (7)$$

або

$$\vec{g}_1 = \left(-2\pi \frac{d\varphi}{dt} \cdot y + z'_o(t); y'_o(t) + 2\pi \frac{d\varphi}{dt} \cdot z; 0 \right). \quad (8)$$

Потім, щоб знайти реакцію μ_1 в'язі спіральної поверхні витка шнека і реакцію μ_2 в'язі поверхні кожуха ШК, ми множимо записані скалярні значення відповідних компонентів рівняння (2) на відповідні значення одиничних векторів $\vec{n}_1$ і $\vec{n}_2$ з рівняння (6).

В результаті отримуємо:

- за умови $i = 1$, або за умови вібрації частинки тільки на поверхні спірального витка

$$0 = -\frac{T}{c(0,5D)} m_c g \sin \varphi - \frac{\pi D}{c(0,5D)} m_c g + \mu_1 - f_2 \mu_2 \frac{\pi D T}{c(0,5D) |0,5\dot{\vec{D}}|} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right) + f_1 \mu_1 T \frac{[-z'_o(t) \sin \varphi + y'_o(t) \cos \varphi]}{c(0,5D) |0,5\dot{\vec{D}} - \vec{g}_1|}, \quad (9)$$

або враховуючи (8) і той факт, що $\dot{\vec{D}} = d\vec{D}/dt$, $c(0,5D) = \pi D \sqrt{tg^2 \beta + 1} = \pi D / \cos \beta$,

$$0 = -m_c g (\sin \varphi \sin \beta + \cos \beta) + \mu_1 - f_2 \mu_2 \frac{\pi D \sin \beta}{|d\vec{D}/dt|} (d\varphi/dt) + f_1 \mu_1 \sin \beta \frac{[-z'_o(t) \sin \varphi + y'_o(t) \cos \varphi]}{|0,5(d\vec{D}/dt) - (d/dt)[0,5 \cos \varphi_o(t); 0,5 \sin \varphi_o(t)] - (d/dt)t[z_o]}; \quad (10)$$

- за умови $i = 2$, або одночасної вібрації частинки матеріалу на поверхні спірального витка та кожуха ШК

$$m_c a_c = 0,5 m_c D (\dot{\varphi})^2 = 0,5 D m_c \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = -m_c g \cos \varphi + \mu_2 - \frac{f_1 \mu_1 [z'_o(t) \cos \varphi + y'_o(t) \sin \varphi]}{|0,5\dot{\vec{D}} - \vec{g}_1|}, \quad (11)$$

або з урахуванням (8) і того факту, що $\dot{\vec{D}} = d\vec{D}/dt$

$$0,5 D m_c \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = -m_c g \cos \varphi + \mu_1 - \frac{f_1 \mu_2 [z'_o(t) \cos \varphi + y'_o(t) \sin \varphi]}{\left| 0,5 \frac{d\vec{D}}{dt} - \frac{d}{dt} [0,5 \cos \varphi_o(t); 0,5 \sin \varphi_o(t)] - \frac{d}{dt} [z_o(t); y_o(t); 0] \right|}. \quad (12)$$

Залежності (10), (12) являють собою систему рівнянь, розв'язок якої щодо невідомих реакцій в'язі поверхні спірального витка μ_1 шнека з поверхнею корпусу μ_2 ШК має вигляд:

$$\mu_1 = \frac{m_c g \sin \beta (\sin \varphi + m_c g) - f_2 \mu_2 \frac{\pi D \sin \beta}{|0,5 \frac{d\vec{D}}{dt}|} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)}{1 + f_1 \sin \beta \frac{[-z'_o(t) \sin \varphi + y'_o(t) \cos \varphi]}{\left| 0,5 \frac{d\vec{D}}{dt} - \frac{d}{dt} [0,5 \cos \varphi_o(t); 0,5 \sin \varphi_o(t)] - \frac{d}{dt} [z_o]} \right|}; \quad (13)$$

$$\mu_2 = m_c \left[0,5D \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + g \cos \varphi \right] + \frac{f_1 \mu_1 \left[z'_o(t) \cos \varphi + y'_o(t) \sin \varphi \right]}{\left| 0,5 \left(\frac{d\bar{D}}{dt} \right) - \frac{d}{dt} [0,5 \cos \varphi_o(t); 0,5 \sin \varphi_o(t)] - \frac{d}{dt} [z_o(t); y_o(t); 0] \right|}}. \quad (14)$$

Підставляючи значення реакцій μ_2 в'язі поверхні корпусу ШК із залежності (14) у рівняння (13), отримуємо залежність для визначення реакції μ_1 в'язі поверхні спірального витка шнека

$$\mu_1 = m_c \left\{ 0,5D \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 f_2 + g [\sin \varphi \sin \beta + \cos \beta + f_2 \cos \varphi] \right\} / \left[\frac{\left(\frac{d\bar{D}}{dt} \right)}{2\pi D \sin \beta \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)} + \frac{f_1 \left\{ \sin \beta [-z'_o(t) \sin \varphi + y'_o(t) \cos \varphi] \right\} - f_1 f_2 [z'_o(t) \sin \varphi + y'_o(t) \cos \varphi]}{\left| 0,5 \left(\frac{d\bar{D}}{dt} \right) - \frac{d}{dt} [0,5 \cos \varphi_o(t); 0,5 \sin \varphi_o(t)] - \frac{d}{dt} [z_o(t); y_o(t); 0] \right|}} \right]. \quad (15)$$

В кінцевому випадку з рівняння (2) руху матеріальної частинки масою m_c знаходимо

$$m_c T \ddot{\varphi} = 2\pi m_c g - \frac{\mu_1}{c(0,5D)} (2\pi)^2 0,5D - f_2 \mu_2 \frac{T(\dot{\varphi} - 2\pi\omega)}{|0,5\dot{\bar{D}}|} - f_1 \mu_1 \frac{T(\dot{\varphi} - 2\pi\omega)}{|0,5\dot{\bar{D}} - \bar{g}_1|}, \quad (16)$$

або

$$m_c \pi D \operatorname{tg} \beta \left(\frac{d^2 \varphi}{dt^2} \right) = 2\pi (m_c g - \mu_1 \cos \beta) - 2\pi D (\operatorname{tg} \beta - 1) \left(\frac{d\varphi}{dt} \right) \times \left[f_2 \mu_2 \left| \frac{d\bar{D}}{dt} \right|^{-1} - f_1 \mu_1 \left(\left| \frac{d\bar{D}}{dt} - 2 \frac{d}{dt} [0,5 \cos \varphi_o(t); 0,5 \sin \varphi_o(t)] - 2 \frac{d}{dt} [z_o(t); y_o(t); 0] \right|^{-1} \right) \right]. \quad (17)$$

Якщо вібрація зернини відсутня, то залежності (14) і (17) істотно спрощуються.

У цьому випадку ми отримуємо:

$$\mu_1 = m_c \left\{ \frac{2\pi f_2 D \sin \beta \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)}{\left| \frac{d\bar{D}}{dt} \right|} \left[0,5D \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + g \cos \varphi \right] + g (\sin \varphi \sin \beta + \cos \beta) \right\}; \quad (18)$$

$$\mu_2 = m_c \left[0,5D \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + g \cos \varphi \right]. \quad (19)$$

Таким чином, отримані диференціальні залежності (13), (14), (17) є математичною моделлю, яка характеризує технологічний процес роботи ШК і може бути використана для подальшого обґрунтування конструктивно-кінематичних параметрів пневмошнекового транспортера.

Для повнішого опису технологічного процесу роботи ШК диференціальні залежності (10), (18), (19) необхідно доповнити заданими початковими умовами: $\varphi(0) = \varphi_o$; $\dot{\varphi}(0) = d\varphi/dt = \dot{\varphi}_1$.

При цьому необхідно зазначити, що математична модель (9), (12) є адекватною лише за умови $\mu_i > 0$.

Якщо ця умова не виконується і $\mu_i < 0$, то матеріальна частинка (зернина) втрачає контакт з поверхнею і рівняння (2) не адекватно описує реальний процес руху матеріальної частинки масою

m_c в ШК.

Також необхідно додати, що залежності (18), (19) можуть мати стаціонарні розв'язки відносно реакцій в'язі μ_{P_i} відповідних площин і кута повороту φ_{P_i} , які відповідають іншим точкам спокою:

$$\mu_{1P_i} = m_c g \left[\frac{T}{c(0,5D)} \sin \varphi_{P_i} + \frac{2\pi 0,5D}{c(0,5D)} (1 + f_2 \cos \varphi_{P_i}) \right]; \quad (20)$$

$$\mu_{2P_i} = m_c g \cos \varphi_{P_i}; \quad (21)$$

$$0 = 2\pi m_c g - \frac{\mu_{1P_i}}{c(0,5D)} (2\pi) 0,5D + 2\pi f_2 \mu_{2P_i} + 2\pi f_2 \mu_{2P_i} T / c(0,5D). \quad (22)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{1P_i} &= m_c g (\sin \varphi_{P_i} \sin \beta + \cos \beta + f_2 \cos \varphi_{P_i} \cos \beta); \\ \mu_{2P_i} &= m_c g \cos \varphi_{P_i}; \\ m_c g - \mu_{1P_i} \cos \beta + f_2 \mu_{2P_i} (1 + \sin \beta) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (23)$$

Для визначення φ_{P_i} виключимо із системи рівнянь (23) значення реакції зв'язку μ_{iP_i} .

У результаті розв'язання (23) отримуємо залежність

$$\begin{aligned} \cos \varphi_{P_i} \left(1 + \operatorname{ctg} \varphi_{P_i} \left\{ \operatorname{ctg} \beta + [\pi D \sin \beta (f_2 \sin \beta - \cos \beta)]^{-1} \right\} \right) = \\ = \left\{ \operatorname{ctg} \beta - [\pi D \sin \beta (f_2 \sin \beta - \cos \beta)]^{-1} \right\} \end{aligned} \quad (24)$$

Із системи рівнянь (23) заміною компоненти $\sin \varphi_{P_i} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{P_i}}$ та введенням позначення $\cos \varphi_{P_i} = x$ одержуємо канонічне рівняння другого степеня, розв'язок якого відносно φ_{P_i} має вигляд

$$\begin{aligned} \sin \varphi_{P_{1,2}} = - \frac{f_2 [\cos \beta (\cos \beta - T f_1 \cos \beta / \pi D f_2) + 1]}{\left(T^2 \cos^2 \beta / \pi^2 D^2 + f_2^2 [\cos \beta (\cos \beta - T f_1 \cos \beta / \pi D f_2) + 1]^2 \right)^{1/2}} \pm \\ \pm \frac{T \cos \beta}{\pi D} \sqrt{f_2^2 [\cos \beta (\cos \beta - T f_1 \cos \beta / \pi D f_2) + 1]^2 - \cos^2 \beta} \end{aligned} \quad (25)$$

Відповідно до рівняння (24) 3D графічні залежності були побудовані як функція $\sin \varphi_{P_i} = f(D, T)$, рис. 4.

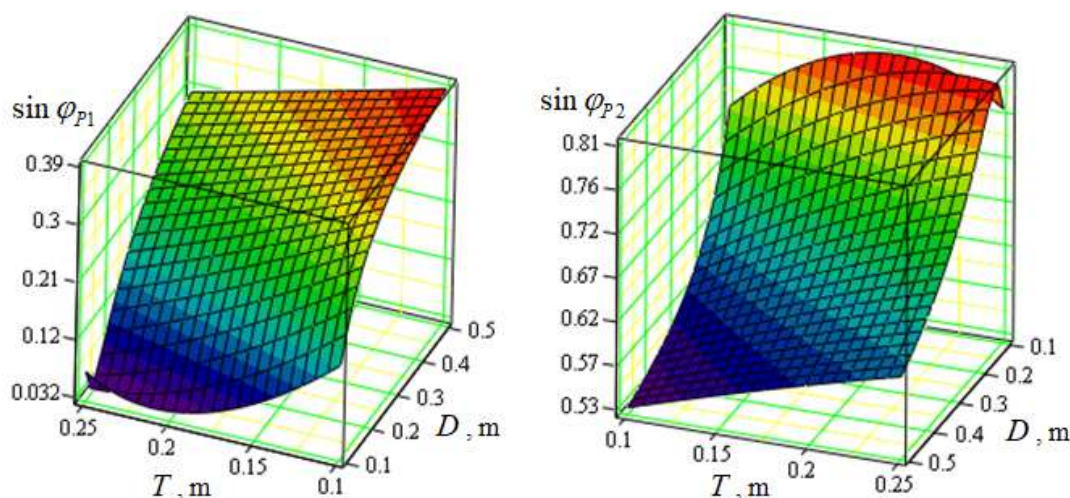


Рис. 4. Залежність зміни кута відхилення φ_{P_i} матеріальної частинки від D і T як функція $\sin \varphi_{P_i} = f(D, T)$

На основі аналізу графічних побудов встановлено, що кут відхилення φ_{1p} частинки зерна під час її руху по спіральному витку шнека змінюється в діапазоні $0 \dots 72$ град., причому залежно від збільшення діаметра D шнека та кроку T шнека відхилення частинки при зміні кута в межах $45 \dots 72$ град. має прямий характер, а в діапазоні $0 \dots 45$ градусів – зворотний характер.

У цьому випадку за умови $\mu_{ir_1} > 0$ можна ідентифікувати набір допустимих параметрів моделі, виходячи з точки зору її адекватності та стійкості стаціонарних рішень безвібраційного процесу роботи ШК.

Чисельне дослідження математичної моделі (18), (19) реалізовано за допомогою прикладної програми для персонального комп'ютера, а в результаті заміни залежність (18) приведена до системи $\dot{\varphi}(t) = \dot{\psi}(t)$ диференціальних рівнянь першого порядку.

Висновки.

1. Запропоновано методологію та принцип розробки математичних моделей, що функціонально описують процес руху зернового матеріалу в шнековому конвеєрі пневмошнекового транспортера з урахуванням можливих вібраційних процесів.
2. На аналітичному рівні визначено сили реакції спірального витка шнека та корпусу шнекового конвеєра, величина яких функціонально залежить від кута повороту та кутової швидкості шнека.
3. Результати дослідження доцільно використовувати в процесі оптимізації конструктивно-кінематичних параметрів і режимів роботи шнекових конвеєрних механізмів.

Список використаних джерел

1. Hevko R.B., Baranovsky V.M., Lyashuk O.L., Pohrishchuk B.V., Gumeniuk Y.O. et al. (2018). The influence of bulk material flow on technical and economical performance of a screw conveyor INMATEH–Agricultural Engineering, 56 (3/2018), 175–184.
2. Lech M. (2001). Mass flow rate measurement in vertical pneumatic conveying of solid. Powder Technology, 114, 1–3, 55–58.
3. Baranovsky Viktor, Gritsay Yury, Marinenko Sergey. (2019). Experimental investigations of the homogeneity coefficient of root crops crushed particles. Scientific Journal of TNTU (Tern.), 94, 2, 80–89.
4. Pankiv V.R., Tokarchuk O.A. (2017). Investigation of constructive geometrical and filling coefficients of combined grinding screw conveyor. INMATEH–Agricultural engineering, 51, 1/2017, 59–68.
5. Merritt A.S., Mair R.J. (2015). No access Mechanics of tunnelling machine screw conveyors: model tests. Géotechnique, 56, 9, 605–615.
6. Pankiv Vitalii. Throughput capability of the combined screw chopper conveyor. Scientific Journal of TNTU (Tern.). 2017. Vol. 85. No. 1. P. 69–79.
7. 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.
8. Nilsson L.G. On the vertical screw conveyor for non-cohesive bulk materials. Acela polytechnic Scandinavia. Stockholm. 1971. 96 p.
9. Baranovsky V., Pankiv M., Komar R., Berezhenko B., Korol O. Mathematical model of the screw conveyor loading hopper. Scientific Journal of TNTU (Tern.). 2021. Vol. 104 (4). P. 109–122.
10. 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.
11. Hevko R.B., Yazlyuk B.O., Pankiv V.R. et al. Feasibility study of mixture transportation and stirring process in continuous-flow conveyors. INMATEH–Agricultural Engineering. 2017. Vol. 51. No. 1/2017. P. 49–58.
12. Olt J., Bulgakov V., Trokhaniak O., Klendii M., Gadzalo I.A., Ptashnik M., Tkachenko M. Harrow with screw-type operating tools: Optimization of design and process parameters. Agronomy Research. 2022. Vol. 20. No. 4. P. 751–763.
13. Karetin V., Baranovsky V., Stukhlyak P., Kurko A. The results of experimental studies transfer coefficient inertial torque coupling screw conveyor. Innovative Solution in Modern Science. 2020. Vol. 5 (41). P. 85–96.
14. Baranovsky V., Grytsay Y., Berezhenko B. Experimental studies of the coefficient of crushing of root crops with a screw conveyor-crusher. Innovative Solution in Modern Science. 2019. Vol. 4 (31). P. 20–

36.

15.Hevko R.B., Rozum R.I., Klendiy O.M. Development of design and investigation of operation processes of loading pipes of screw conveyors. INMATEH – Agricultural Engineering. 2016. Vol. 50. No. 3. P. 89–94.

16.Aulin V.V., Pankov A.O., Zamota T.M., Lyashuk O.L., Hryniv A.V., Tykhyi A.A., Kuzyk A.V. Development of mechatronic module for the seeding control system. INMATEH – Agricultural Engineering. 2019. Vol. 59. No. 3. P. 1–8.

17.Baranovsky V., Gritsai Y. Experimental research on productivity of auger root cutter conveyor. Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. 2019. Vol. 15(3).

18.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.

19.Romanovsky R.M., Baranovsky V.M., Hevko R.B., Dzyura V.O. et al. Justification of rational parameters of a pneumoconveyor screw feeder. INMATEH –Agricultural Engineering.2018. Vol. 54 (1/2018).P. 15–24.

20.Bulgakov V., Olt J., Ivanovs S., Trokhaniak O., Gadzalo Ja., Adamchuk V., Chernovol M., Pascuzzi S. Santoro F., Arak M. Research of a contact stresses in swivel elements of flexible shaft in screw conveyor for transportation of agricultural materials. Estonian Academic Agricultural Society. Agraarteaus. 2022. Vol. 33. No. 1. P. 67–73.

21.Dolgunin V.S. Segregation Modeling of particle rapid gravity flow / V.S. Dolgunin, A.A. Ukolov // Powder Technology. – 1995. – Vol. 83. – P. 95.

22.Experimental and analytical research on gravity flows of particulate solids / V.N. Dolgunin, V.J. Borschov, P.A. Ivanov, A.M. Klimov // 4-th Wordl Congress of Particle Technology Full text of paper in SD-Rom. Sidney, 2002.

23. Baranovsky V., Karp I., Salo Y., Berezenko B., Marushchak P. Analysis of the process of material movement in a screw conveyor. Scientific Journal of TNTU (Tern.). 2025. Vol. 117. No 1. P. 5–17.

24.Shen H.H., Ackermann N.I. Constitutive Relationships for Fluid–Solid Mixtures. Dev. Engineering Mechanik – ASCE. 1982. Vol. 108(1). P. 748.

25.Ackerman N.I., Shen H.H. Stresses in rapidly Fluid–Solid Mixtures. // Dev. Engineering Mechanik – ASCE. 1982. Vol. 108(3). P. 95–113.

26.Welshcof G. Pneumatische Forderung bei grossen fordergut-konzentrationen. Dusseldorf : VDI-Verlag GMBH, 1962. 492 S.

Рецензент: Барановський Віктор Миколайович, професор кафедри інжинірингу машинобудівних технологій, доктор технічних наук, професор.