

УДК 621.867.42

© Б.М. Гевко, д.т.н.; А.Є. Дячун, к.т.н.

Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя
Р.С. Грудовий, к.т.н.

Житомирський національний агроєкологічний університет

І.Б. Гевко, д.т.н.

Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ ЗЕРНОВОГО ВАНТАЖУ У КОНВЕЄРІ ІЗ ШНЕКОМ З ПОСТУПОВО ЗРОСТАЮЧИМ КРОКОМ ВИТКІВ У НАПРЯМКУ РУХУ ВАНТАЖУ

У статті досліджено кінематику зернового вантажу на основі рівнянь руху матеріальних частинок у гвинтовому конвеєрі із шнеком з поступово зростаючим кроком витків. Встановлено прирости кроку шнека на одному витку. Проведено детальний аналіз руху вантажу у швидкохідному та тихохідному гвинтових конвеєрах. Визначено величину прискорення вантажу. Побудовано графіки швидкостей вантажу.

ШНЕК, КІНЕМАТИКА, КРОК ВИТКА, ГВИНТОВИЙ КОНВЕЄР.

Постановка проблеми. Для зменшення енергетичних витрат і травмування зерна та збільшення надійності гвинтових робочих органів розроблено ряд оригінальних конструкцій шнеків із змінним кроком витків. Застосування таких шнеків потребує вирішення питань, пов'язаних з особливостями визначення навантажень на шнек та характеру руху вантажу а також доцільності їх використання.

До переваг застосування таких шнеків можна віднести збільшення коефіцієнта завантаження у зоні переміщення вантажу із бункера у шнек, що призводить до зростання його продуктивності, також такі шнеки сприяють поступовому зростанню швидкості переміщення вантажу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням дослідження кінематики зернового вантажу у гвинтових транспортно-технологічних механізмах присвячені наукові праці Григор'єва А.В. [1], Германа Х. [2], Гевка Б.М., Рогатинського Р.М. [3], Гевка І.Б. [4, 5] та багатьох інших. У вказаних працях досліджено кінематику вантажу у швидкохідних та тихохідних гвинтових конвеєрах із шнеками, що мають постійний крок витків. Застосування шнеків із поступово зростаючим кроком витків в напрямку руху вантажу у гвинтових конвеєрах вносить свої корективи у кінематику вантажу, оскільки

останній одержує прискорення в осьовому напрямку шнека.

Мета досліджень – дослідити кінематику зернового вантажу у гвинтовому конвеєрі із шнеком, що має рівномірно збільшений крок витків в напрямку руху вантажу.

Результати дослідження. Зміну величини кроку шнека представимо у вигляді графіка (рис. 1), де показано, що початковий крок шнека T_0 зростає на величину ΔT на кожному наступному витку.

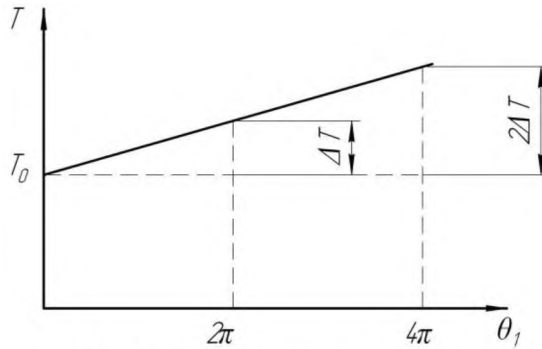


Рис. 1 - Графік зміни кроку шнека

Один виток шнека відповідає кутівому параметру $\theta_1=2\pi$, тоді функцію зміни кроку шнека можна записати наступним чином

$$T(\theta_1) = T_0 + \frac{\Delta T \theta_1}{2\pi}. \quad (1)$$

Приріст кроку шнека на одному витку

$$\Delta T = \frac{T_{\max} - T_0}{i - 1}, \quad (2)$$

де T_{\max} - максимальний крок шнека, м; i - загальна кількість робочих витків шнека.

Максимальний крок шнека T_{\max} і початковий крок шнека T_0 пов'язані із коефіцієнтом кроку шнека $k_T = \frac{T}{D}$, який для зернових матеріалів коливається в межах від $k_{T1}=0,8$ до $k_{T2}=1,2$ [1], де D - зовнішній діаметр шнека, м. Тому:

$$T_{\max} = k_{T2} \cdot D; \quad (3)$$

$$T_0 = k_{T1} \cdot D; \quad (4)$$

$$\Delta T = \frac{D(k_{T2} - k_{T1})}{i - 1}. \quad (5)$$

Довжину робочої частини шнека знаходимо за формулою

$$L = i \cdot T_0 + \Delta T \cdot \sum_{i=1}^i (i-1). \quad (6)$$

Підставляючи (3) і (5) у (6), після перетворень, будемо мати:

$$L = D \cdot k_{T1} \left(i + \frac{k_{T2} - k_{T1}}{k_{T1} (i-1)} \sum_{i=1}^i (i-1) \right). \quad (7)$$

Під час роботи гвинтового конвеєра кутовий параметр θ_1 визначається особливостями руху вантажу. Для встановлення характеру навантаження на складові частини конвеєра по всій його довжині розглянемо рух частинки вантажу в координатах xuz (рис. 2). Після встановлення характеру цього руху можна визначити характер навантажень на шнек та кожух під час переміщення вантажу.

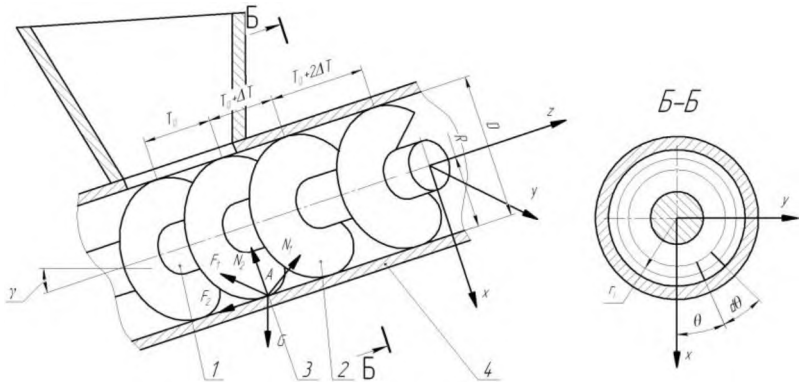


Рис. 2 - Розрахункова схема переміщення частинки вантажу у нахиленому гвинтовому конвеєрі: 1 – приводний вал; 2 – шнек із поступово зростаючим кроком витків; 3 – частинка вантажу; 4 – кожух

Розглянемо режим роботи конвеєра, в склад якого входить шнек із поступово зростаючим кроком витків. Із умови контакту частинки вантажу А з гвинтовою поверхнею шнека та циліндричною поверхнею кожуха, її розміщення визначається радіальним параметром R і кутовим параметром θ .

В параметричному вигляді координати частинки А визначаються такими залежностями:

$$\begin{cases} x_A = R \cdot \cos \theta; \\ y_A = R \cdot \sin \theta; \\ z_A = \left(T_0 + \frac{\Delta T}{2\pi} \theta_1 \right) \frac{(\omega t - \theta)}{2\pi}, \end{cases} \quad (8)$$

де x_A, y_A, z_A , – координати частинки, м; R – радіальний параметр частинки, м; θ – кутовий параметр частинки, рад; ω – кутова швидкість обертання шнека, рад/с; t – час, с.

Швидкості руху частинки відносно шнека в напрямку осей x, y, z :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{x}_A - \dot{x}_{lu}; \\ \dot{y}_1 = \dot{y}_A - \dot{y}_{lu}; \\ \dot{z}_1 = \dot{z}_A - \dot{z}_{lu}, \end{cases} \quad (9)$$

$\dot{x}_A, \dot{y}_A, \dot{z}_A$, – проєкції швидкості руху частинки на осі координат x, y, z , м/с; $\dot{\delta}_{lu}, \dot{\delta}'_{lu}, \dot{z}_{lu}$ – проєкції швидкості руху шнека на осі координат x, y, z , м/с.

Оскільки кожух нерухомий, то швидкості руху частинки відносно кожуха в напрямку осей x, y, z , дорівнюють:

$$\begin{cases} x_2 = x_A; \\ y_2 = y_A; \\ z_2 = z_A. \end{cases} \quad (10)$$

Проєкції швидкості руху частинки знаходимо, диференціюючи рівняння (3.8) для загального випадку, коли $R \neq const$:

$$\begin{cases} \dot{x}_A = \frac{dR}{dt} \cos \theta - R \cdot \sin \theta \cdot \frac{d\theta}{dt}; \\ \dot{y}_A = \frac{dR}{dt} \sin \theta + R \cdot \cos \theta \cdot \frac{d\theta}{dt}; \\ \dot{z}_A = \frac{\Delta T}{2\pi} \frac{d\theta_1}{dt} \left(\frac{\omega t - \theta}{2\pi} \right) + \frac{1}{2\pi} \left(\omega - \frac{d\theta}{dt} \right) \left(T_0 + \frac{\Delta T \theta_1}{2\pi} \right). \end{cases} \quad (11)$$

Швидкість руху шнека визначаємо за залежностями:

$$\begin{cases} \dot{x}_{1u} = R \cdot \omega \sin \theta; \\ \dot{y}_{1u} = R \cdot \omega \cos \theta; \\ \dot{z}_{1u} = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Згідно з (9), враховуючи залежності (11) і (12), знаходимо

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{dR}{dt} \cos \theta + R \cdot \sin \theta \cdot \left(\omega - \frac{d\theta}{dt} \right); \\ \dot{y}_1 = \frac{dR}{dt} \sin \theta - R \cdot \cos \theta \cdot \left(\omega - \frac{d\theta}{dt} \right); \\ \dot{z}_1 = \frac{\Delta T}{2\pi} \frac{d\theta_1}{dt} \left(\frac{\omega t - \theta}{2\pi} \right) + \frac{1}{2\pi} \left(\omega - \frac{d\theta}{dt} \right) \left(T_0 + \frac{\Delta T \theta_1}{2\pi} \right). \end{cases} \quad (13)$$

Модулі швидкості руху частинки відносно шнека і кожуха визначаємо за формулами:

$$|\dot{s}_1| = \sqrt{\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 + \dot{z}_1^2}; \quad (14)$$

$$|\dot{s}_2| = \sqrt{\dot{x}_A^2 + \dot{y}_A^2 + \dot{z}_A^2}. \quad (15)$$

Підставляючи рівняння (13) у (14) і (15), приймаючи допущення, що частинка перебуває у постійному контакті із жолобом і радіальний параметр частинки не змінюється в часі ($R=const$), після скорочень, отримуємо:

$$|\dot{s}_1| = \sqrt{\left[R^2 + \frac{1}{4\pi^2} \left(T_0 + \frac{\Delta T \theta_1}{2\pi} \right)^2 \right] \left(\omega - \frac{d\theta}{dt} \right)^2 + \frac{\Delta T^2}{4\pi^2} \frac{d\theta_1^2}{dt} \left(\frac{\omega t - \theta}{2\pi} \right)^2 + \frac{\Delta T}{2\pi^2} \frac{d\theta_1}{dt} \left(\frac{\omega t - \theta}{2\pi} \right) \left(\omega - \frac{d\theta}{dt} \right) \left(T_0 + \frac{\Delta T \theta_1}{2\pi} \right)}; \quad (16)$$

$$|\dot{s}_2| = \sqrt{R^2 \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + \frac{1}{4\pi^2} \left(T_0 + \frac{\Delta T \theta_1}{2\pi} \right)^2 \left(\omega - \frac{d\theta}{dt} \right)^2 + \frac{\Delta T^2}{4\pi^2} \frac{d\theta_1^2}{dt} \left(\frac{\omega t - \theta}{2\pi} \right)^2 + \frac{\Delta T}{2\pi^2} \frac{d\theta_1}{dt} \left(\frac{\omega t - \theta}{2\pi} \right) \left(\omega - \frac{d\theta}{dt} \right) \left(T_0 + \frac{\Delta T \theta_1}{2\pi} \right)}. \quad (17)$$

Прискорення частинки визначаємо, диференціюючи рівняння (13) при $R=const$

$$\begin{cases} \ddot{x} = R \cos \theta \frac{d\theta}{dt} \left(\omega - \frac{d\theta}{dt} \right) - R \sin \theta \frac{d^2\theta}{dt^2}; \\ \ddot{y} = R \sin \theta \frac{d\theta}{dt} \left(\omega - \frac{d\theta}{dt} \right) + R \cos \theta \frac{d^2\theta}{dt^2}; \\ \ddot{z} = \frac{\Delta T}{2\pi} \frac{d\theta_1}{dt} \left(\frac{\omega - \frac{d\theta}{dt}}{2\pi} \right) + \frac{\Delta T}{2\pi} \frac{d^2\theta_1}{dt^2} \left(\frac{\omega t - \theta}{2\pi} \right) + \frac{1}{2\pi} \left(-\frac{d^2\theta}{dt^2} \left(T_0 + \frac{\Delta T \theta_1}{2\pi} \right) + \left(\omega - \frac{d\theta}{dt} \right) \frac{\Delta T}{2\pi} \frac{d\theta_1}{dt} \right). \end{cases} \quad (18)$$

Результати числових та експериментальних досліджень, а також досліджень, представлених в роботі [3] свідчать, що незалежно від початкових умов транспортування після проходження зони перехідного режиму встановлюється стабільний режим транспортування. Враховуючи те, що період невстановленого руху частинки невеликий і не перевищує 0,6...0,8 с для швидкохідних конвеєрів і 1...1,5 с для тихохідних визначальне значення для встановлення силових параметрів має аналіз часткових рішень.

Розглянемо стабільний режим транспортування у швидкохідному конвеєрі (рис. 3), в якому вантаж рухається по гвинтовій траєкторії і для якого дійсні умови: $\frac{d\theta}{dt} = const = \omega_*$,

$\frac{d^2\theta}{dt^2} = 0$, $\frac{d\theta_1}{dt} = const = \omega_*$, $\frac{d^2\theta_1}{dt^2} = 0$, $\frac{dR}{dt} = 0$, $R = const$, де ω_* - кутова швидкість обертання вантажу, рад/с.

z , мм

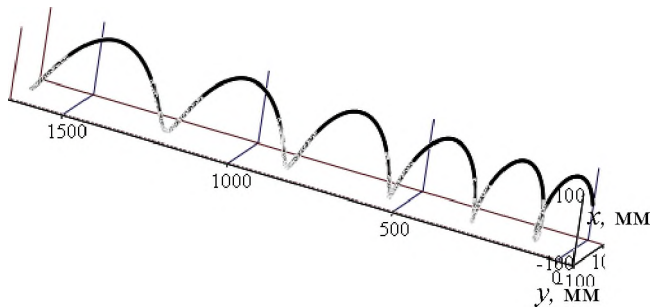


Рис. 3 - Траєкторія руху частинки у швидкохідному конвеєрі, шнек якого має змінний крок витків: $R=100$ мм; $\omega=32$ рад/с

При прийнятих умовах з (13) знайдемо проекції швидкості руху частинки відносно шнека на осі системи координат x_1z_1

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = R \cdot \sin(\omega_e t) \cdot (\omega - \omega_e); \\ \dot{y}_1 = -R \cdot \cos(\omega_e t) \cdot (\omega - \omega_e); \\ \dot{z}_1 = \frac{\Delta\Gamma}{2\pi} \omega_e \left(\frac{\omega t - \omega_e t}{2\pi} \right) + \frac{1}{2\pi} (\omega - \omega_e) \left(T_0 + \frac{\Delta\Gamma \omega_e t}{2\pi} \right). \end{cases} \quad (19)$$

Проекції швидкості руху частинки відносно кожуха на осі системи координат x_2z_2 :

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = R \cdot \sin(\omega_e t) \cdot \omega_e; \\ \dot{y}_2 = -R \cdot \cos(\omega_e t) \cdot \omega_e; \\ \dot{z}_2 = \frac{\Delta\Gamma}{2\pi} \omega_e \left(\frac{\omega t - \omega_e t}{2\pi} \right) + \frac{1}{2\pi} (\omega - \omega_e) \left(T_0 + \frac{\Delta\Gamma \omega_e t}{2\pi} \right). \end{cases} \quad (20)$$

Модулі швидкості руху частинки визначаємо за виразами:

$$\begin{aligned} |s_1| = & \sqrt{\left(R^2 + \frac{1}{4\pi^2} \left(T_0 + \frac{\Delta\Gamma \omega_e t}{2\pi} \right)^2 \right) (\omega - \omega_e)^2 + \frac{\Delta\Gamma^2}{4\pi^2} \omega_e^2 \left(\frac{\omega t - \omega_e t}{2\pi} \right)^2 +} \\ & + \frac{\Delta\Gamma}{2\pi^2} \omega_e \left(\frac{\omega t - \omega_e t}{2\pi} \right) (\omega - \omega_e) \left(T_0 + \frac{\Delta\Gamma \omega_e t}{2\pi} \right); \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} |s_2| = & \sqrt{\left(R^2 + \frac{\Delta\Gamma^2}{4\pi^2} \left(\frac{\omega t - \omega_e t}{2\pi} \right)^2 \right) \omega_e^2 + \frac{1}{4\pi^2} \left(T_0 + \frac{\Delta\Gamma \omega_e t}{2\pi} \right)^2 (\omega - \omega_e)^2 +} \\ & + \frac{\Delta\Gamma}{2\pi^2} \omega_e \left(\frac{\omega t - \omega_e t}{2\pi} \right) (\omega - \omega_e) \left(T_0 + \frac{\Delta\Gamma \omega_e t}{2\pi} \right). \end{aligned} \quad (22)$$

На основі формули (22) будовані графіки зміни швидкості руху частинки відносно кожуха у швидкохідному конвеєрі в часі (рис. 4).

Прискорення частинки визначаємо за рівняннями:

$$\begin{cases} \ddot{x} = R\omega_s \cos(\omega_s t)(\omega - \omega_s); \\ \ddot{y} = R\omega_s \sin(\omega_s t)(\omega - \omega_s); \\ \ddot{z} = \frac{\Delta T}{2\pi^2} \omega_s (\omega - \omega_s). \end{cases} \quad (23)$$

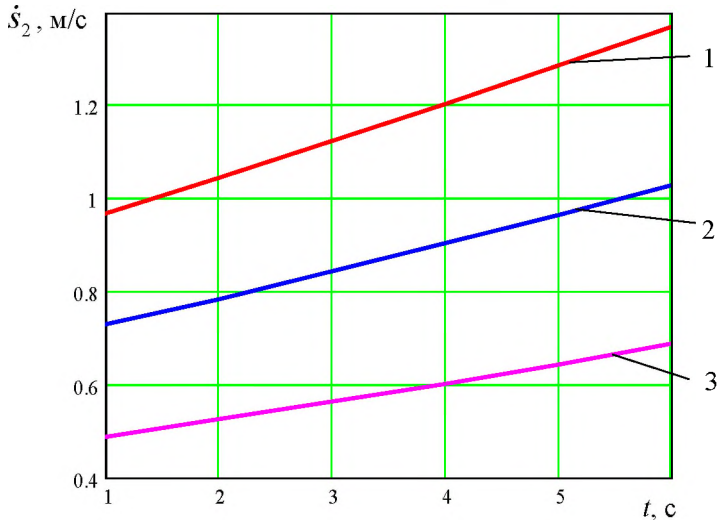


Рис. 4 - Графіки зміни швидкості руху частинки відносно кожуха у швидкохідному конвеєрі в часі $k_{T1}=0,8$, $k_{T2}=1,211$, $\omega=32$ рад/с: 1 - $R=0,1$ м, $T_0=0,16$ м, $\Delta T=0,012$ м; 2 - $R=0,075$ м, $T_0=0,12$ м, $\Delta T=0,009$ м; 3 - $R=0,05$ м, $T_0=0,08$ м, $\Delta T=0,006$ м

Розглянемо стабільний режим транспортування у тихохідному конвеєрі, в якому вантаж рухається по лінійній траєкторії і для якого дійсні умови: $\theta = \text{const}$, $\frac{d\theta}{dt} = 0$, $\frac{d^2\theta}{dt^2} = 0$, $\frac{d\theta_1}{dt} = \text{const} = \omega$, $\frac{d^2\theta_1}{dt^2} = 0$,

$\frac{dR}{dt} = 0$, $R = \text{const}$. Тоді проекції швидкості руху частинки відносно шнека на осі системи координат x, y, z будуть становити:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = R \cdot \sin \theta \cdot \omega; \\ \dot{y}_1 = -R \cdot \cos \theta \cdot \omega; \\ \dot{z}_1 = \frac{\Delta T}{2\pi} \omega \left(\frac{\omega t - \theta}{2\pi} \right) + \frac{1}{2\pi} \omega \left(T_0 + \frac{\Delta T \omega t}{2\pi} \right). \end{cases} \quad (24)$$

Проекції швидкості руху частинки відносно кожуха на осі системи координат x_2z_2 :

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = 0; \\ \dot{y}_2 = 0; \\ \dot{z}_2 = \frac{\Delta T}{2\pi} \omega \left(\frac{\omega t - \theta}{2\pi} \right) + \frac{1}{2\pi} \omega \left(T_0 + \frac{\Delta T \omega t}{2\pi} \right). \end{cases} \quad (25)$$

Модулі швидкості руху частинки

$$|\dot{s}_1| = \omega \sqrt{R^2 + \frac{1}{4\pi^2} \left[\left(T_0 + \frac{\Delta T \theta}{2\pi} \right)^2 + \Delta T^2 \left(\frac{\omega t - \theta}{2\pi} \right)^2 \right] + \frac{\Delta T}{2\pi^2} \left(\frac{\omega t - \theta}{2\pi} \right) \left(T_0 + \frac{\Delta T \theta}{2\pi} \right)}; \quad (26)$$

$$|\dot{s}_2| = \frac{\Delta T}{2\pi} \omega \left(\frac{\omega t - \theta}{2\pi} \right) + \frac{1}{2\pi} \omega \left(T_0 + \frac{\Delta T \omega t}{2\pi} \right). \quad (27)$$

На основі формули (27) будовані графіки зміни швидкості руху частинки відносно кожуха у тихохідному конвеєрі в часі (рис. 5)

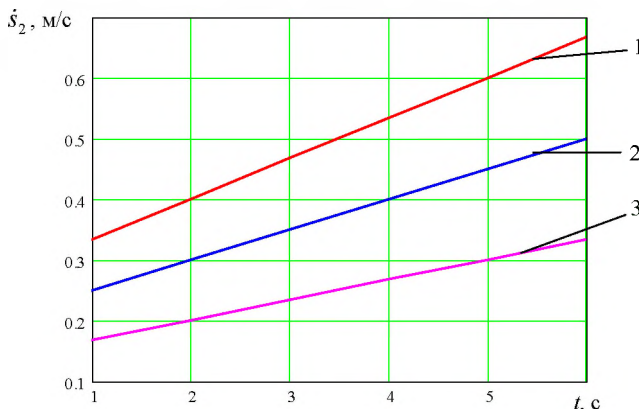


Рис. 5 - Графіки зміни швидкості руху частинки відносно кожуха у тихохідному конвеєрі в часі $k_{T1}=0,8$, $k_{T2}=1,211$, $\omega=10,5$ рад/с: 1 - $R=0,1$ м, $T_0=0,16$ м, $\Delta T=0,012$ м; 2 - $R=0,075$ м, $T_0=0,12$ м, $\Delta T=0,009$ м; 3 - $R=0,05$ м, $T_0=0,08$ м, $\Delta T=0,006$ м

Прискорення частинки визначаємо за рівняннями:

$$\begin{cases} \ddot{x} = 0; \\ \ddot{y} = 0; \\ \ddot{z} = \frac{\Delta T}{2\pi^2} \omega^2. \end{cases} \quad (28)$$

Висновки. Досліджено кінематику сипкого вантажу у гвинтовому конвеєрі із шнеком, що має рівномірно збільшений крок витків в напрямку руху вантажу. На основі графіків рис. 4 і 5 встановлено, що при застосуванні шнеків із поступово зростаючим кроком витків відбувається поступове збільшення швидкості транспортування вантажу, що зменшує ударні навантаження на шнек під час пуску. Крім того, частинка одержує прискорення в напрямку транспортування, що також покращує умови її переміщення.

Література

1. Григорьев А. М. Винтовые конвейеры / А. М. Григорьев. – М. : Машиностроение, 1972. – 184 с.
2. Герман Х. Шнековые механизмы в технологии ФРГ / Х. Герман. – Л. : Химия, 1975. – 230 с.
3. Гевко Б. М. Винтовые подающие механизмы сельскохозяйственных машин / Б. М. Гевко, Р. М. Рогатынский. – Львів : Вища школа, 1989. – 176 с.
4. Гевко І. Б. Гвинтові транспортно–технологічні механізми: розрахунок і конструювання / І. Б. Гевко. – Тернопіль : ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008. – 307 с.
5. Гевко І. Моделювання характеру навантаження на гвинтові робочі органи / І. Гевко // Вісник ТНТУ. – 2011. – Т. 16, № 1. – С. 69–77.

ANNOTATIONS

Gevko B., Dyachun A., Grudovyy R., Gevko I. Research of kinematics of grain cargo conveyor with screw with gradually growing step of coils in the direction of motion of cargo. *The kinematics of grain cargo on the basis of equations of motion of material particles in the screw conveyor with gradually growing step of coils are explored in the article. The step increments on the one coil are determined. The detailed analysis of motion of cargo in high-speed and low-speed screw conveyors is conducted. The value of acceleration of cargo is defined. The graphs of velocities of cargo are built.*

АННОТАЦИИ

Гевко Б.М., Дячун А.Е., Грудовой Р.С., Гевко И.Б. Исследование кинематики зернового груза в конвейере с шнеком с постепенно возрастающим шагом витков в направлении движения груза. *В статье исследована кинематика зернового груза на основе уравнений движения материальных частиц в винтовом конвейере с шнеком с постепенно возрастающим шагом витков. Установлены приросты шага шнека на одном витке. Проведен детальный анализ движения груза в быстроходных и тихоходных винтовых конвейерах. Определена величина ускорения груза. Построены графики скоростей груза.*