

УДК 621.356.2

**О. Ляшук, канд. техн. наук; О. Рогатинська, канд. техн. наук;
Т. Пелешок, канд. техн. наук; Р. Любачівський**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТРАНСПОРТУВАННЯ СИПКОГО ВАНТАЖУ ПОХИЛИМИ ГВИНТОВИМИ КОНВЕЄРАМИ

Резюме. Розглянуто режим роботи похилого гвинтового конвеєра до складу якого входить гвинтовий робочий орган із постійними параметрами. Із умови контакту виділеного об'єму вантажу з гвинтовою поверхнею шнека та циліндричною поверхнею кожуха її розміщення визначається радіальним параметром R і кутовим параметром θ . Встановлено граничні відхилення швидкостей частинок у процесі транспортування й виведено аналітичні залежності. Виведено аналітичні залежності для визначення кутової й осьової швидкості руху частинок по нахилених поверхнях.

Ключові слова: гвинтовий робочий орган, гвинтовий конвеєр, шнек.

O. Lyashyk, O. Rohatynska, T. Peleshok, R. Lubachivsky

INVESTIGATION OF TRANSPORTATION BULK CARGO SLOPING SCREW CONVEYOR

Summary. Screw conveyers, which are characterized by the simple design, high reliability, easy handling and adaptation in the automated systems being ecologically-friendly, have been widely used for the technological operations of the bulk-cargo transporting and mixing. To decrease the power consumption and to raise the quality of bulk-cargo mixing some original constructions of screw mixers with the screw operating member have been developed. Application of such screws requires to solve problems dealing with the determination of loadings on the screw operating member and the characteristic of the bulk-cargo movement, as well reasonability of their application.

The operating regime of the inclined screw conveyor, which consists of screw operating member with constant parameters, has been analyzed. From the condition of the bulk-cargo particle contact with the screw surface and the case cylinder surface its location is determined by the radial parameter and the angle parameter.

Boundary deviations of the particles speeds while transporting have been found and analytical dependences have been deduced.

Analytical dependencies for finding angular speed and central speed of the particles movement along the inclined surfaces have been deduced.

The proposed method for finding average circular velocity of the particle ω according to the boundary values ω_1 and ω_2 is characterized by the mathematic clearness and simplicity of realization. Integration dependence has been deduced.

Key words: screw your body, screw conveyor, auger.

Умовні позначення

μ_1 та μ_2 – коефіцієнти тертя вантажу до поверхні спіралі та кожуха;

ω – кутова швидкість шнека;

$d\theta / dt = \omega_A$ – кутова швидкість колового руху виділеного елемента;

α – кут підйому гвинтової спіралі;

ω_c – середня кутова швидкість виділеного об'єму по періоду;

$\Delta\omega$ – амплітуда коливання значення $d\theta/dt$ в часі;

β_0 – кут підйому траси транспортування $g = 0$;

k_w – експериментальний коефіцієнт;

V_0 – швидкість частинки при $g=0$;
 V_1 – швидкість частинки максимальна (падіння);
 V_2 – швидкість частинки мінімальна (підйом);
 N_{10} – сили, що діють на частинку з боку шнека;
 N_{20} – сили, що діють на частинку з боку жолоба (N_2 співпадає з V);
 β – кут нахилу траєкторії $\beta_1=\beta_{\min}$ при співпаданні швидкості V з силою тяжіння (падіння) $\beta_2=\beta_{\max}$ при протидії (підйомі).

Постановка проблеми. Для технологічних операцій переміщення і змішування сипких вантажів велике розповсюдження набули гвинтові конвеєри, які характеризуються простотою конструкції та, відповідно, високою надійністю, прості в користуванні, легкістю адаптування при використанні в автоматизованих системах та екологічністю [1 – 3, 7 – 8]. Крім цього, їх питома вага завантажувально розвантажувальних операцій в народному господарстві зростає. Для зменшення енергетичних витрат і підвищення якості змішування сипких матеріалів розроблено ряд оригінальних конструкцій гвинтових конвеєрів та змішувачів із гвинтовим робочим органом. Застосування таких шнеків потребує вирішення питань, пов'язаних з особливостями визначення навантажень на гвинтовий робочий орган та характеру руху вантажу, а також доцільності їх використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням транспортування і змішування різних матеріалів присвячені праці, Григор'єва А.М. [1], Баришева А.І. [4], Гевка Б.М., Рогатинського Р.М. [5 – 6], Гевка І.Б. [8] та інших. Однак, враховуючи різноманітність технологічних процесів і конструктивного виконання гвинтових транспортно-технологічних механізмів (ГТТМ), вони потребують подальших досліджень і уточнень різних параметрів теоретичного й практичного значення.

Мета роботи – розрахунок параметрів руху виділеного об'єму похилим швидкохідним гвинтовим конвеєром.

Результати досліджень. Під час роботи швидкохідного гвинтового конвеєра вантаж переміщається по гвинтовій траєкторії і задається кутовим параметром θ , який визначається особливостями руху вантажу. Для встановлення характеру навантаження на складові конвеєра по всій його довжині розглянемо транспортування виділеного об'єму вантажу гвинтовим конвеєром у координатах xuz (рис. 1).

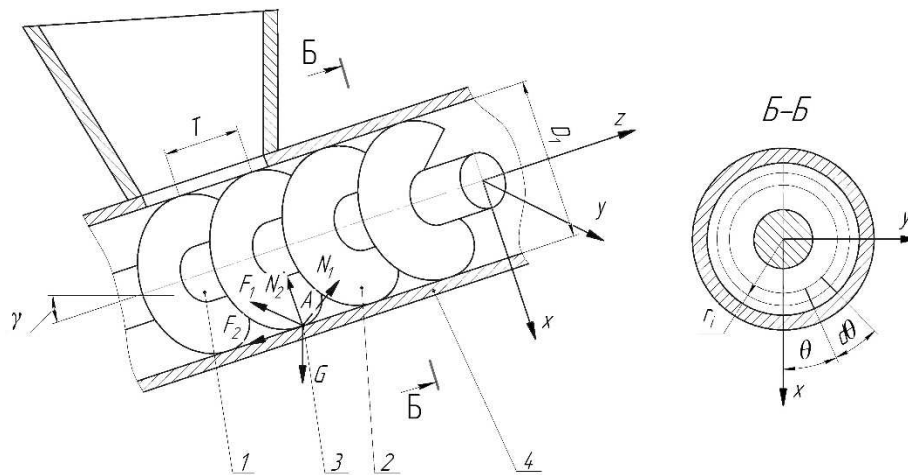


Рисунок 1. Розрахункова схема переміщення виділеного об'єму вантажу у похилому гвинтовому конвеєрі: 1 – приводний вал; 2 – шнек із поступово зростаючим кроком витків; 3 – частинка вантажу; 4 – кожух

Figure 1. Diagram of the selected volume of cargo moving in an inclined screw conveyor 1 – drive shaft; 2 – screw with gradually increasing increments of turns; 3 – piece goods; 4 – casing

Розглянемо швидкохідний похилий гвинтовий конвеєр з гвинтовим робочим органом із постійними параметрами – зовнішнім діаметром шнека D і кроком T . Із умови контакту виділеного об'єму вантажу A з гвинтовою поверхнею шнека та циліндричною поверхнею кожуха його розміщення визначається радіальним параметром $R=D/2$ і кутовим параметром θ . У відповідності з рис. 1 на виділений об'єм A масою m будуть діяти такі сили: нормальні від поверхонь N_1 і N_2 , сили тертя F_1 і F_2 ($\mu_1 N$ і $\mu_2 N$), сили тяжіння $G = mg$, відцентрова від обертання виділеного об'єму вантажу.

Розглянемо усталений режим транспортування у похилому швидкохідному конвеєрі. В загальному випадку рівняння руху виділеного об'єму вантажу A у гвинтовому конвеєрі, що нахилений під кутом γ до горизонту відносно змінного параметру θ описується диференціальним рівнянням [6]

$$\begin{aligned} & (T^2 + \pi^2 D^2) \left(\frac{d^2 \theta}{dt^2} \right) + \mu_2 \left[\pi D \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 - 2\pi g \sin \theta \cos \gamma \right] \left\{ \pi D \left[\pi D - \mu_1 T \sin(d\theta / dt - \omega) \right] + \right. \\ & \left. + T \left[T + \mu_1 D \sin(d\theta / dt - \omega) \right] \left(\frac{d\theta}{dt} - \omega \right) \right\} / \sqrt{\pi^2 D^2 \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + T^2 \left(\frac{d\theta}{dt} - \omega \right)^2} + \\ & \left. + 2\pi g \left\{ \sin \gamma \left[T + \mu_1 D \sin(d\theta / dt - \omega) \right] + \cos \theta + \cos \gamma \left[\pi D - \mu_1 T \sin(d\theta / dt - \omega) \right] \right\} = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Для швидкохідних конвеєрів вантаж переміщається гвинтовою траєкторією, кут підйому β якої визначається за залежністю [6]

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} \alpha (\omega - d\theta / dt). \quad (2)$$

Для випадку $\gamma \neq 0$ $\frac{d\theta}{dt} \neq \text{const}$; $\frac{d^2 \theta}{dt^2} \neq \text{const}$; $\beta \neq \text{const}$ диференціальне рівняння руху виділеного об'єму масою dm у явному вигляді не розв'язується. Умова $\frac{d^2 \theta}{dt^2} = \text{const}$, яка приймається в [1], суттєво впливає на характер зміни параметрів і для детального аналізу руху виділеного об'єму не може бути прийнятою. Детальні дослідження рівняння [5] на ЕОМ Рунге-Кутта показали, що після $t=0,5 \dots 0,6$ настає усталений процес руху, в якому колова та кутова ω_A швидкості виділеного об'єму змінюються в часі за гармонічним законом для зони транспортування (рис.2.) У першому наближенні цю залежність можна представити у вигляді

$$\omega_A = \omega_c \left[1 + \frac{\Delta \omega}{\omega_c} \cos \omega_c t + \frac{\Delta \omega^2}{2\omega^2 - \Delta \omega^2} \cos(2\omega_c t) \right]. \quad (3)$$

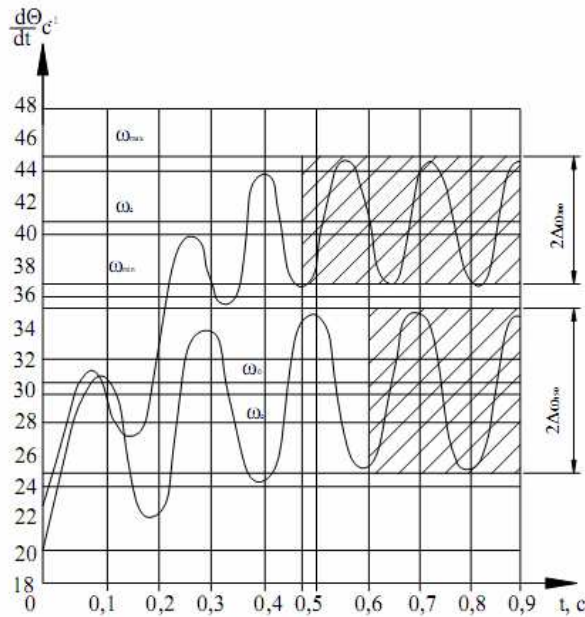


Рисунок 2. Зміна кутової швидкості виділеного об'єму у швидкохідному горизонтальному конвеєрі: $1-\omega=200 \text{ c}^{-1}$; $2-\omega=150 \text{ c}^{-1}$

Figure 2. Changing the angular velocity of the selected volume in high-speed horizontal conveyor $1-\omega = 200 \text{ s}^{-1}$; $2-\omega = 150 \text{ s}^{-1}$

На рис. 3 представлена розрахункова схема у вигляді векторної діаграми до виведення рівняння руху виділеного об'єму у гвинтовому конвеєрі, що розміщені під кутом до горизонту, і визначення його осьової швидкості

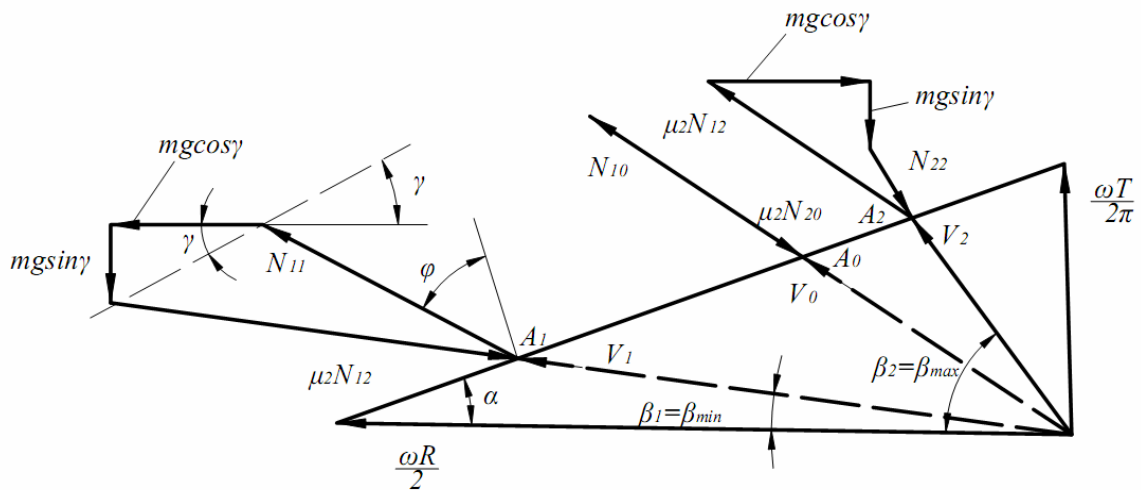


Рисунок 3. Розрахункова схема виділеного об'єму у гвинтовому конвеєрі з визначенням осьової швидкості

Figure 3. Diagram to output equation of motion of a selected volume in the screw conveyor and determine its axial velocity

Використовуючи метод графічного аналізу руху виділеного об'єму рис.3., бачимо, що максимальному значенню ω_A^{\max} відповідає мінімальне значення β_{\min} і мініимальному ω_A^{\min} – максимальне β_{\max} . В цих точках ($\omega = \omega_A^{\max}$ і $\omega = \omega_A^{\min}$) $\varepsilon = d\omega_A / dt = 0$ – кутові прискорення, що дорівнюють нулю і рівняння руху (1) переходять у спрощені залежності

$$\begin{aligned}\Sigma\theta = 0: N_1(\sin\alpha + \mu_1 \cos\alpha) - \mu_2 \omega_{A1,2}^2 R \sin\beta_{1,2} + g \cos\gamma &= 0, \\ \Sigma z = 0: N_1(\cos\alpha - \mu_1 \cos\alpha) - \mu_2 \omega_{A1,2}^2 \cos\beta_{1,2} - g \sin\gamma &= 0\end{aligned}, \quad (4)$$

де (+) відповідає $\omega_A^{\max}, \beta_{\min}$ коли вантаж гвинтом опускається до низу, а (-) відповідно $\omega_A^{\min}, \beta_{\max}$, коли вантаж гвинтом піднімається.

Після відповідних перетворень отримуємо рівняння

$$\mu_2 \frac{\omega_A^2 D_{1,2}}{2} \cos(\beta_{1,2} + \alpha + \varphi_1) = g[\sin\gamma \sin(\alpha + \varphi_1) \mp \cos\gamma \cos(\alpha + \varphi_1)], \quad (5)$$

де знак (+) для $\omega_{A2} = \omega_A^{\max}$; (-) для $\omega_{A2} = \omega_A^{\min}$. Знайдемо параметр відхилення кута β , що визначається $\Delta\beta_{1,2} = \beta_{1,2} - \beta_0 = \beta_{1,2} - 90^\circ - \alpha - \gamma$. Враховуючи те, що $\beta_{1,2} + \alpha + \varphi = 90^\circ - \Delta\beta_{1,2}$, із залежності (5).

$$\Delta\beta_{1,2} = \beta_{1,2} - \beta_0 = \mp \arcsin \left[\frac{g \cos(\alpha + \varphi_1 \mp \gamma)}{\mu_2 \omega_{A1,2}^2 R} \right]. \quad (6)$$

Виключенням N_1 із системи рівнянь отримаємо співвідношення рівноважного стану при екстремальних значеннях кутової швидкості виділеного елемента ($\omega_A^{\min}, \omega_A^{\max}$).

$$\mu_2 \omega_{A1,2}^2 R \cos(\alpha + \beta_{1,2} + \varphi) \mp g \cos\varphi \cos(\alpha + \varphi_1) - g \sin\gamma \sin(\alpha + \varphi_1). \quad (7)$$

Аналіз цього рівняння [6] показує, що вплив прискорень $d^2\theta/dt^2$ розподіляє реакції поверхонь N_1 і N_2 і змінює напрямок руху виділеного об'єму (параметр β) у кутовому інтервалі $0 \leq \theta \leq \pi/2$.

Запропонований метод визначення середньої колової швидкості виділеного об'єму ω по крайніх значеннях ω_1 і ω_2 відзначається математичною строгістю і простотою реалізації.

Згідно з (6) кутова швидкість обертання гвинтового робочого органу повинна визначатись із залежності

$$\omega = \sqrt{\frac{k_w g [\cos\gamma + \sin\gamma \operatorname{tg}(\alpha + \gamma_1)]}{\mu_2 R}}. \quad (8)$$

При такому режимі роботи змішувача максимальний кут підйому траєкторії руху вантажу $\beta_{2\max}$ визначиться із залежності

$$\operatorname{tg}\beta_{2\max} = k_\beta \operatorname{tg}\alpha, \quad (9)$$

$$\begin{aligned}\text{тут } k_\beta &= 1 + \frac{C}{2} \left[1 - \sqrt{1 + \frac{L_1}{C \sin\alpha (\sin\alpha + \mu_1 \cos\alpha)}} \right], \\ C &= \frac{\mu_2 \omega^2 R \operatorname{tg}\alpha \operatorname{tg}(\alpha - \varphi)}{g \sin\gamma \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\alpha + \varphi)}}.\end{aligned} \quad (10)$$

Мінімальна кутова швидкість виділеного об'єму вантажу в його русі по гвинтовій траєкторії $\omega = \omega_1^{\max}$ буде

$$\omega_2^{\max} = \frac{\omega \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta_{2\max}}. \quad (11)$$

Середня осьова швидкість переміщення вантажу у гвинтовому змішувачі при цьому

$$v_{oc} = \frac{\omega R \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta_{2\max}}{2(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta_{2\max})} = \frac{\omega R \operatorname{tg} \alpha k_\beta}{2(1 + k_\beta)}. \quad (12)$$

Об'ємно продуктивність змішувача, відповідно, становить

$$Q = \frac{\pi k_{ci} k_\beta \omega R^3 \operatorname{tg} \alpha}{2(1 + k_\beta)} \quad (13)$$

При побудові рівнянь (4) було зроблено припущення безвідривності руху. Воно виконується при забезпеченні умов, коли $N_1 > 0$; $N_2 > 0$, що справджується умова при

$$\omega_A = \frac{d\theta}{dt} \geq \sqrt{(2g \cos \gamma) / D}. \quad (14)$$

Звідси впливає умова, яка має важливе значення при формуванні експлуатаційних обмежень

$$\frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha \cos \beta} < 1 / \sqrt{\frac{D\omega^2}{2g} \cos \gamma}; \operatorname{tg} \beta < \left(1 / \sqrt{\frac{D\omega^2}{2g} \cos \gamma} - 1 \right) \operatorname{tg} \alpha. \quad (15)$$

Висновки: Наведено методику розрахунку похилих швидкохідних гвинтових конвеєрів, які в граничних режимах призводять до інтенсивного перемішування вантажу і працюють як ефективні змішувачі. Виведено залежності для визначення кінематичних та експлуатаційних параметрів, що забезпечують стабільну роботу таких змішувачів.

Conclusion:

The design procedure of of inclined screw conveyor speed boundary regimes which are lead to the of intensive mixing of cargo and operate as efficient mixer. The derived depending to determine the the kinematic and operational parameters that ensure the stable operation of mixers.

Список використаної літератури

1. Григорьев, А.М. Винтовые конвейеры / [Текст] А.М. Григорьев. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
2. Конвейеры: справочник / [Текст] Р.А. Волков, А.Н. Гнутов, В.К. Дьячков и др.; под общ. ред. Ю.А. Пертена. – Л.: Машиностроение, 1984. – 367 с.
3. Барышев, А.И. Расчет и проектирование транспортных средств непрерывного действия / [Текст] А.И. Барышев, В.А. Будашевский и др. Донецк: изд. Морд-Преса, 2005. – 696 с.
4. Рогатинський, Р.М. Механіко-технологічні основи взаємодії шнекових робочих органів з сировиною сільськогосподарського виробництва: дис. докт. техн. наук: 05.20.01, 05.05.05 / [Текст] Рогатинський Роман Михайлович. – К.: 1997. – 502 с.
5. Гевко, Б.М. Винтовые подающие механизмы сельскохозяйственных машин / [Текст] Б.М. Гевко, Р.М. Рогатинский. – Львів: Вища школа, 1989. – 176 с.

6. ГОСТ Конвейеры винтовые для кормов. Основные параметры : ГОСТ 23976-80. – М.: Изд-во стандартов 1980, 19 с.
7. ГОСТ Шнеки для сельскохозяйственных машин: ГОСТ 2705 – 73. – М.: Изд-во стандартов 1973, 16 с.
8. Рогатинський, Р.М. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів [Текст] / Р.М. Рогатинський, І.Б. Гевко, А.Є. Дячун – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2014. – 278 с.

Отримано 03.07.2015