

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ У ГВИНТОВОМУ КОНВЕЄРІ-ЗМІШУВАЧІ ІЗ ОБЕРТОВИМ КОЖУХОМ ТА ГОФРОВАНИМ ШНЕКОМ

Дячун А.Є., к.т.н, доц., Ляшук О.Л., д.т.н, доц., Котик Р.М.,
Михайлюк В.П., Гандзій В.С.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

У статті представлено нову конструкцію гвинтового конвеєра із обертовим кожухом та гофрованим шнеком для одночасного транспортування та змішування сипких матеріалів у тваринництві. Розроблена конструкція дозволяє забезпечувати підвищення інтенсивності змішування матеріалу, що транспортується. Досліджено кінематику сипкого вантажу на основі рівнянь руху у гвинтовому конвеєрі із обертовим кожухом та гофрованим шнеком. Проведено аналіз руху вантажу при усталеному швидкохідному режимі.

Постановка проблеми. Гвинтові конвеєри широко використовуються в народному господарстві, зокрема у тваринництві для переміщення сипких, шматкових, в'язко-пластичних та інших матеріалів і сумішей. Вони характеризуються простотою конструкції, зручністю в користуванні, високою надійністю. Важливим є можливість поєднання функції транспортування із рядом технологічних процесів, зокрема змішування матеріалів у відповідних транспортно-технологічних системах. Проте гвинтові конвеєри, порівняно із іншими, мають підвищену енергоємність і її зниження є важливою науково-технічною проблемою.

Для зменшення енергетичних витрат і підвищення якості змішування сипких матеріалів розроблено ряд оригінальних конструкцій гвинтових змішувачів із гофрованими шнеками та обертовими кожухами. Застосування таких шнеків потребує вирішення питань, пов'язаних з особливостями визначення характеру руху вантажу, а також доцільності їх використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням дослідження кінематики сипкого вантажу у гвинтових транспортно-технологічних механізмах присвячені наукові праці Василенка П.М. [1], Григор'єва А.В. [2], Гевка Б.М. [3], Рогатинського Р.М. [4, 5], Гевка І.Б. [4], Owen P.J. [6], Shimizu Y. [7] та багатьох інших. У вказаних працях досліджено кінематику вантажу у швидкохідних та тихохідних гвинтових конвеєрах із шнеками, що мають постійний крок витків. Застосування конвеєрів із обертовим кожухом та гофрованим шнеком вносить свої корективи у кінематику вантажу, оскільки обертання кожуха призводить до зміни величини кроку руху вантажу при швидкохідному режимі, а гофрований шнек надає матеріалу додаткових осьових коливань.

Метою роботи є дослідити кінематику сипкого матеріалу у гвинтовому конвеєрі із обертовим кожухом та гофрованим шнеком.

Результати дослідження. З метою підвищення продуктивності транспортування із одночасним змішуванням сільськогосподарських сипких вантажів гвинтовими механізмами актуальним залишається питання пошуку їх прогресивних конструкцій. До таких механізмів належать гвинтові конвеєри з обертовими кожухами та гофрованими шнеками, які дозволяють забезпечувати підвищення інтенсивності змішування матеріалу, що транспортується. На основі проведеного патентного пошуку та аналізу наукових літературних джерел і проведеного синтезу розроблено і запатентовано ряд конструкцій гвинтових конвеєрів з обертовими кожухами, на базі яких спроектовано експериментальну установку, загальний вигляд якої представлено на рисунку 1, розрахункова схема для визначення кінематики вантажу представлена на рис. 2, а основні варіанти комбінованих гофрованих шнеків представлено на рис. 3.

Експериментальну установку (рис. 1 - рис. 3) виконано у вигляді вала 9, до якого жорстко закріплено гофрований шнек 10, що знаходиться в циліндричному кожусі 3 з можливістю обертового руху. У верхній частині на нерухомій рамі 2 закріплено вивантажувальний патрубковий 5, електродвигун 6, який через пасову передачу з'єднано з валом 9, та електродвигун 7, який через пасову передачу з'єднано з циліндричним обертовим кожухом 3, розміщеним на підшипникових опорах 16. На нижній частині обертового кожуха 3, що знаходиться в бункері 4, закріплено додатковий шнек завантаження та змішування 11. Бункер 4 розділено перегородкою 17. Нижній кінець вала 1 встановлено на підшипниковій опорі 12 в корпусі 14. Гвинтовий конвеєр встановлюється на опорі регулювання 1 висоти подачі вантажу та кута нахилу конвеєра відносно горизонту.

До електродвигунів 6 та 7 під'єднано перетворювачі частоти струму Altivar 71, які встановлено у пункті керування частотою обертання приводів 8, якими через ПК 15 здійснюється керування роботою двигунів і гвинтового конвеєра загалом, при цьому є можливість плавного нарощування та зменшення частоти обертання кожуха 3 та шнека 10 в широких межах, що дозволяє виконувати дослідження згідно розробленої методики проведення експериментів.

Експериментальна установка може працювати у режимі прискореного транспортування вантажу та у режимі змішування сипких матеріалів. У першому випадку кожух 3 обертається проти напрямку обертання шнека 10, у другому випадку – у напрямку обертання шнека 10.

Сипкий матеріал через бункер 4 потрапляє в кожух 3 на шнек 10, яким і здійснюється його транспортування та змішування. Обертовий рух шнека та кожух отримують через пасові передачі від двигунів 6 та 7, керування якими здійснюється з ПК 15 з фіксацією усіх необхідних даних у табличному чи графічному вигляді згідно розробленої методики проведення експериментальних досліджень. Додатковий шнек завантаження та змішування 11 в установці можна прикріпляти різної конфігурації з метою дослідження його впливу на силові характеристики і продуктивність конвеєра. Продуктивність гвинтового конвеєра при різних коефіцієнтах заповнення кожуха та частотах обертання шнека та кожуха визначається в

автоматизованому режимі. Силові характеристики можна визначати при плавному та різкому пуску, реверсуванні та моделюванні різноманітних навантажень в автоматизованому режимі за допомогою перетворювача частоти та персонального комп'ютера. При цьому є можливість вибирати ті характеристики, які необхідно досліджувати при проведенні експериментів згідно розробленої методики проведення випробувань. В процесі проведення випробувань вони відображаються на моніторі ПК у вигляді табличних даних та графічних залежностей. Фіксація даних проводиться із наперед заданою частотою.

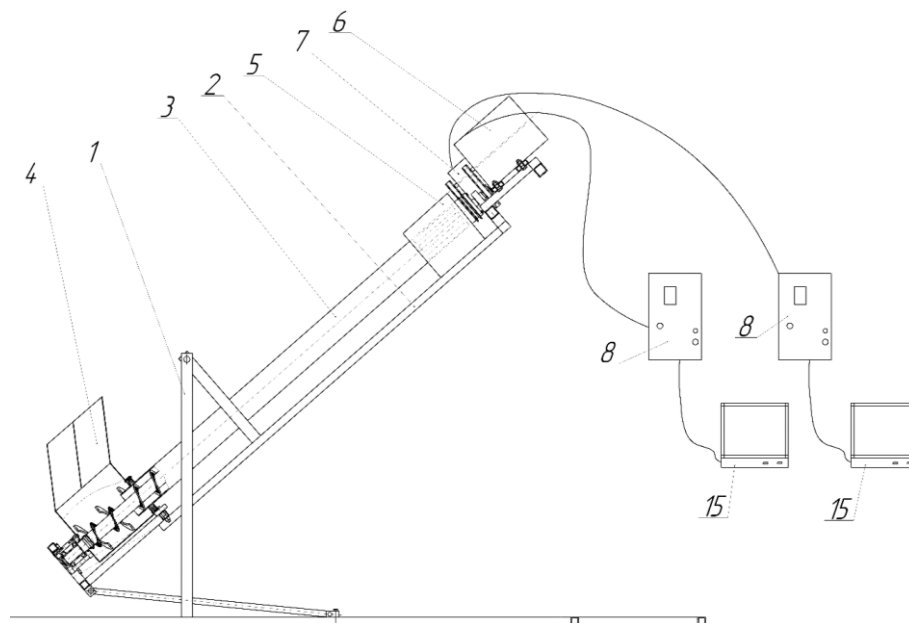


Рис. 1 – Схема експериментальної установки для дослідження транспортування і змішування вантажів гвинтовими конвеєрами з обертовим кожухом та гофрованим шнеком

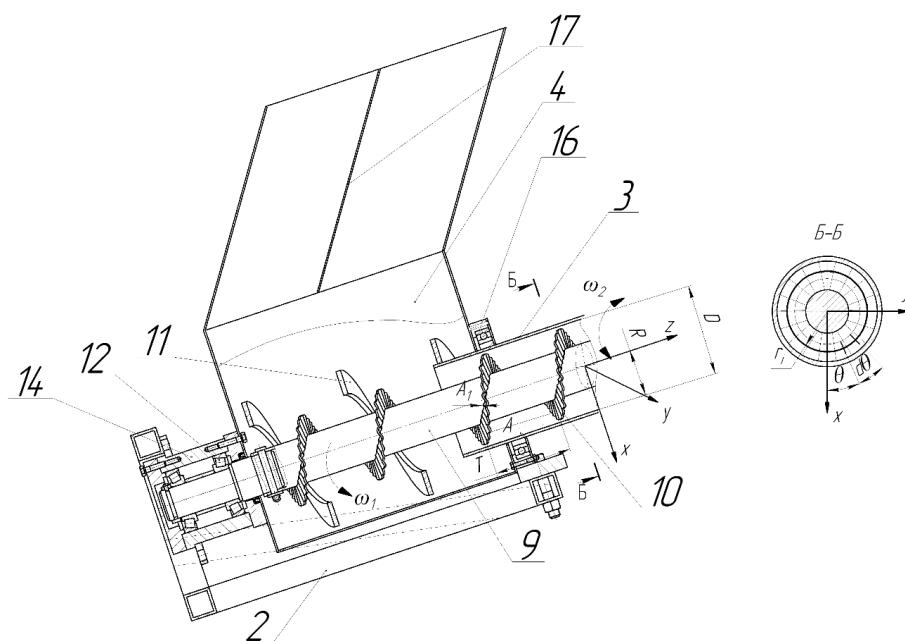
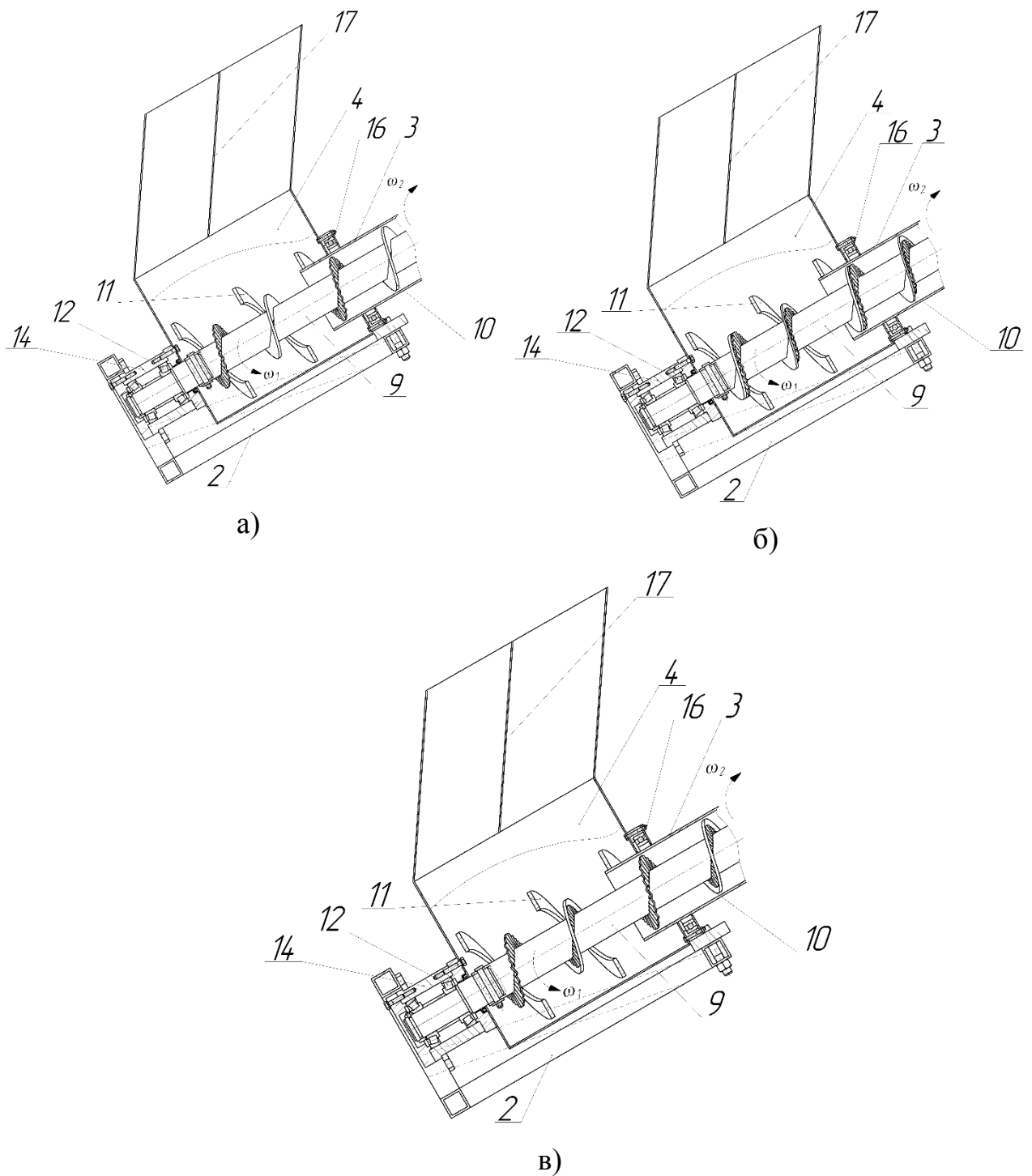


Рис. 2 – Розрахункова схема переміщення виділеного об'єму матеріалу у гвинтовому конвеєрі-змішувачі із обертовим кожухом та гофрованим шнеком по всій ширині



а) послідовне чергування гофрованих та звичайних витків шнека; б) поєднання жорсткого звичайного шнека та гофрованого шнека, який можна змінювати в процесі експериментальних досліджень; в) використання витків шнеків із різною шириною гофрованих витків

Рис. 3 – Робочі органи експериментальної установки для дослідження транспортування і змішування вантажів гвинтовими конвеєрами з обертовим кожухом та основні варіанти комбінованих гофрованих шнеків

Під час роботи гвинтового конвеєра з обертовим кожухом, координати розміщення сипкого матеріалу та його характер руху визначається кутовим параметром матеріалу θ [3–5]. Для встановлення характеру переміщення вантажу

розглянемо рух виділеного об'єму матеріалу в координатах x, y, z (рис. 2). Прийmemo до уваги високошвидкісний режим роботи конвеєра, при якому відбувається одночасне змішування та транспортування вантажу. Із умови одночасного контакту виділеного об'єму матеріалу A з гвинтовою гофрованою поверхнею шнека та циліндричною поверхнею обертового кожуха, його розміщення визначається радіальним параметром R і кутовим параметром θ [3–5].

В параметричному вигляді, з достатньою апроксимацією, координати виділеного об'єму матеріалу A визначаються такими залежностями:

$$\begin{cases} x_A = R \cos \theta; \\ y_A = R \sin \theta; \\ z_A = \frac{T(\omega_1 t - \theta)}{2\pi} + A_1 \sin(k\omega_1 t), \end{cases} \quad (1)$$

де: x_A, y_A, z_A , – координати матеріалу, м; R – радіальний параметр матеріалу, м; θ – кутовий параметр матеріалу, рад; ω_1 – кутова швидкість обертання шнека, рад/с; T – крок витків шнека, м; t – час, с. A_1 – висота гофр, м; k – кількість гофр на одному витку шнека.

Рівняння шнека радіусом R з постійним кроком $T = 2\pi c$, що обертається з кутовою швидкістю ω_1 в параметричній формі буде [3]:

$$x_s = R \cos(v_1 + \omega_1 t), \quad y_s = R \sin(v_1 + \omega_1 t), \quad z_s = cv_1 = (T/2\pi)v_1, \quad (2)$$

де: v_1 – кутовий параметр точки гвинтової поверхні шнека, рад.

Відомо, що рівняння стаціонарного кожуха (не обертового) гвинтового конвеєра, діаметр D якого прийmemo рівним $D = 2R$ має вигляд [3]:

$$x_k = R \cos v_2; \quad y_k = R \sin v_2; \quad z_k = u_2, \quad (3)$$

де: v_2 – кутовий параметр точки гвинтової поверхні кожуха, рад; u_2 – радіальний параметр точки гвинтової поверхні кожуха, м.

Рівняння кожуха, що обертається з кутовою швидкістю $\pm \omega_2$ в параметричній формі прийmemo у вигляді:

$$x_k = R \cos(v_2 \pm \omega_2 t), \quad y_k = R \sin(v_2 \pm \omega_2 t), \quad z_k = u_2, \quad (4)$$

де: ω_2 – кутова швидкість обертання кожуха, рад/с.

Знак “-” у системі рівнянь (4) перед кутовою швидкістю обертання кожуха відноситься до випадку, коли кожух обертається у протилежному напрямку обертання шнека, а знак “+” – для випадку, коли кожух обертається в напрямку обертання шнека.

Швидкості руху матеріалу відносно шнека в напрямку осей x, y, z [4]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{x}_A - \dot{x}_{1s}; \\ \dot{y}_1 = \dot{y}_A - \dot{y}_{1s}; \\ \dot{z}_1 = \dot{z}_A - \dot{z}_{1s}, \end{cases} \quad (5)$$

де: $\dot{x}_A, \dot{y}_A, \dot{z}_A$ – проекції швидкості руху матеріалу на осі координат xuz , м/с;
 $\dot{x}_{1s}, \dot{y}_{1s}, \dot{z}_{1s}$ – проекції швидкості руху шнека на осі координат xuz , м/с.

Швидкості руху матеріалу відносно кожуха в напрямку осей x, y, z , дорівнюють:

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = \dot{x}_A - \dot{x}_{2k}; \\ \dot{y}_2 = \dot{y}_A - \dot{y}_{2k}; \\ \dot{z}_2 = \dot{z}_A - \dot{z}_{2k}, \end{cases} \quad (6)$$

де: $\dot{x}_{2k}, \dot{y}_{2k}, \dot{z}_{2k}$ – проекції швидкості руху кожуха на осі координат xuz , м/с.

Проекції швидкості руху матеріалу знаходимо, диференціюючи рівняння (1) для загального випадку, коли $R \neq \text{const}$:

$$\begin{cases} \dot{x}_A = \frac{dR}{dt} \cos \theta - R \sin \theta \frac{d\theta}{dt}; \\ \dot{y}_A = \frac{dR}{dt} \sin \theta + R \cos \theta \frac{d\theta}{dt}; \\ \dot{z}_A = \frac{T}{2\pi} \left(\omega_1 - \frac{d\theta}{dt} \right) + A_1 \cdot k \cdot \omega_1 \cdot \cos(k \cdot \omega_1 \cdot t). \end{cases} \quad (7)$$

Швидкість руху шнека визначаємо за залежностями [4]:

$$\begin{cases} \dot{x}_{1s} = -R\omega_1 \sin \theta; \\ \dot{y}_{1s} = R\omega_1 \cos \theta; \\ \dot{z}_{1s} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Швидкість руху кожуха визначаємо за залежностями [5]:

$$\begin{cases} \dot{x}_{2k} = \mp R\omega_2 \sin \theta; \\ \dot{y}_{2k} = \pm R\omega_2 \cos \theta; \\ \dot{z}_{2k} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Згідно з формулою (5), враховуючи залежності (7) і (8), знаходимо:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{dR}{dt} \cos \theta + R \sin \theta \left(\omega_1 - \frac{d\theta}{dt} \right); \\ \dot{y}_1 = \frac{dR}{dt} \sin \theta - R \cos \theta \left(\omega_1 - \frac{d\theta}{dt} \right); \\ \dot{z}_1 = \frac{T}{2\pi} \left(\omega_1 - \frac{d\theta}{dt} \right) + A_1 \cdot k \cdot \omega_1 \cdot \cos(k \cdot \omega_1 \cdot t). \end{cases} \quad (10)$$

Згідно з формулою (6), враховуючи залежності (7), (9), також знаходимо:

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = \frac{dR}{dt} \cos \theta + R \sin \theta \left(\pm \omega_2 - \frac{d\theta}{dt} \right); \\ \dot{y}_2 = \frac{dR}{dt} \sin \theta - R \cos \theta \left(\pm \omega_2 - \frac{d\theta}{dt} \right); \\ \dot{z}_2 = \frac{T}{2\pi} \left(\omega_1 - \frac{d\theta}{dt} \right) + A_1 \cdot k \cdot \omega_1 \cdot \cos(k \cdot \omega_1 \cdot t). \end{cases} \quad (11)$$

Модуль швидкості руху матеріалу відносно шнека і кожуха визначаємо за відповідними формулами:

$$|\dot{s}_1| = \sqrt{\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 + \dot{z}_1^2}. \quad (12)$$

$$|\dot{s}_2| = \sqrt{\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2 + \dot{z}_2^2}. \quad (13)$$

Підставляючи рівняння (10) у (12) та (11) у (13), враховуючи те, що

матеріал перебуває у постійному контакті із обертовим кожухом і радіальний параметр матеріалу є постійною величиною в часі ($R=\text{const}$), після скорочень, отримаємо:

$$|\dot{s}_1| = \sqrt{\left(R^2 + \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2}\right) \cdot \left(\omega_1 - \frac{d\theta}{dt}\right)^2 + A_1 k \omega_1 \cos(k \cdot \omega_1 \cdot t) \frac{T}{\pi} \left(\omega_1 - \frac{d\theta}{dt}\right) + A_1^2 k^2 \omega_1^2 \cos^2(k \cdot \omega_1 \cdot t)}; \quad (14)$$

$$|\dot{s}_2| = \sqrt{R^2 \cdot \left(\pm \omega_2 - \frac{d\theta}{dt}\right)^2 + \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot \left(\omega_1 - \frac{d\theta}{dt}\right)^2 + A_1 k \omega \cos(k \cdot \omega_1 \cdot t) \frac{T}{\pi} \left(\omega_1 - \frac{d\theta}{dt}\right) + A_1^2 k^2 \omega_1^2 \cos^2(k \cdot \omega_1 \cdot t)}. \quad (15)$$

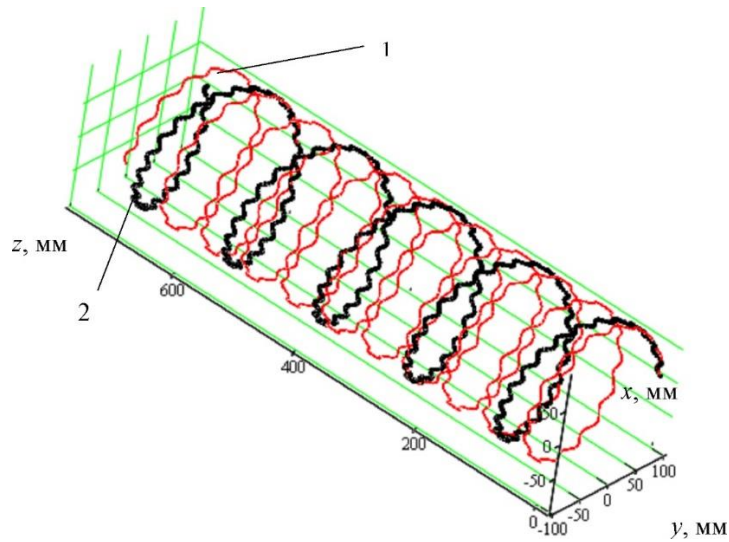
Прискорення матеріалу знаходимо в наслідок диференціювання рівняння (10) за прийнятої умови, що $R=\text{const}$:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = R \cos \theta \frac{d\theta}{dt} \left(\omega_1 - \frac{d\theta}{dt}\right) - R \sin \theta \frac{d^2\theta}{dt^2}; \\ \ddot{y}_1 = R \sin \theta \frac{d\theta}{dt} \left(\omega_1 - \frac{d\theta}{dt}\right) + R \cos \theta \frac{d^2\theta}{dt^2}; \\ \ddot{z}_1 = -\frac{T}{2\pi} \frac{d^2\theta}{dt^2} - A_1 \cdot k^2 \omega_1^2 \sin(k \cdot \omega_1 \cdot t). \end{cases} \quad (16)$$

Розглянемо стабільний режим переміщення вантажу у швидкохідному гвинтовому конвеєрі-змішувачі, в якому матеріал рухається за гвинтовою траєкторією (рис. 4) і для якого при усталеному режимі дійсні умови: $\frac{d\theta}{dt} = \text{const} = \omega_g$, $\frac{d^2\theta}{dt^2} = 0$, $\frac{dR}{dt} = 0$, $R=\text{const}$, де ω_g – кутова швидкість обертання вантажу, рад/с. При прийнятих умовах з (10) знайдемо проекції швидкості руху матеріалу відносно шнека на осі системи координат xuz :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = R \sin(\omega_g t) (\omega_1 - \omega_g); \\ \dot{y}_1 = -R \cos(\omega_g t) (\omega_1 - \omega_g); \\ \dot{z}_1 = \frac{T}{2\pi} (\omega_1 - \omega_g) + A_1 \cdot k \cdot \omega_1 \cdot \cos(k \cdot \omega_1 \cdot t). \end{cases} \quad (17)$$

Проекції швидкості руху матеріалу відносно кожуха на осі системи координат xuz :



1) кожух обертається у протилежному напрямку обертання шнека 2) кожух обертається в напрямку обертання шнека $R=100$ мм; $\omega_1=31,4$ рад/с

Рис. 4 – Графіки траєкторії руху сипкого вантажу у швидкохідному конвеєрі з обертовим кожухом та гофрованим шнеком

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = R \cdot \sin(\omega_g t)(\pm\omega_2 - \omega_g); \\ \dot{y}_2 = -R \cdot \cos(\omega_g t)(\pm\omega_2 - \omega_g); \\ \dot{z}_2 = \frac{T}{2\pi}(\omega_1 - \omega_g) + A_1 \cdot k \cdot \omega_1 \cdot \cos(k \cdot \omega_1 \cdot t). \end{cases} \quad (18)$$

Модулі швидкості руху матеріалу із рівнянь (14) та (15) визначаємо за виразами:

$$|\dot{s}_1| = \sqrt{\left(R^2 + \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2}\right) \cdot (\omega_1 - \omega_g)^2 + A_1 k \omega_1 \cos(k \cdot \omega_1 \cdot t) \frac{T}{\pi} (\omega_1 - \omega_g) + A_1^2 k^2 \omega_1^2 \cos^2(k \cdot \omega_1 \cdot t)}; \quad (19)$$

$$|\dot{s}_2| = \sqrt{R^2 \cdot (\pm\omega_2 - \omega_g)^2 + \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot (\omega_1 - \omega_g)^2 + A_1 k \omega_1 \cos(k \cdot \omega_1 \cdot t) \frac{T}{\pi} (\omega_1 - \omega_g) + A_1^2 k^2 \omega_1^2 \cos^2(k \cdot \omega_1 \cdot t)}. \quad (20)$$

Прискорення матеріалу визначаємо за рівняннями (16):

$$\begin{cases} \ddot{x}_A = R\omega_g \cos(\omega_g t)(\omega_1 - \omega_g); \\ \ddot{y}_A = R\omega_g \sin(\omega_g t)(\omega_1 - \omega_g); \\ \ddot{z}_A = -A \cdot k^2 \omega_1^2 \sin(k \cdot \omega_1 \cdot t). \end{cases} \quad (21)$$

Встановлено, що для режиму швидкохідного транспортування доцільно надавати обертовий рух кожуху в напрямку протилежному обертанню шнека, а для покращення процесу змішування матеріалу, що транспортується доцільним є обертання кожуха в напрямку обертання шнека.

На основі формули (19) будовано графік зміни швидкості руху виділеного об'єму матеріалу відносно гофрованого шнека у гвинтовому конвеєрі (рис. 5)

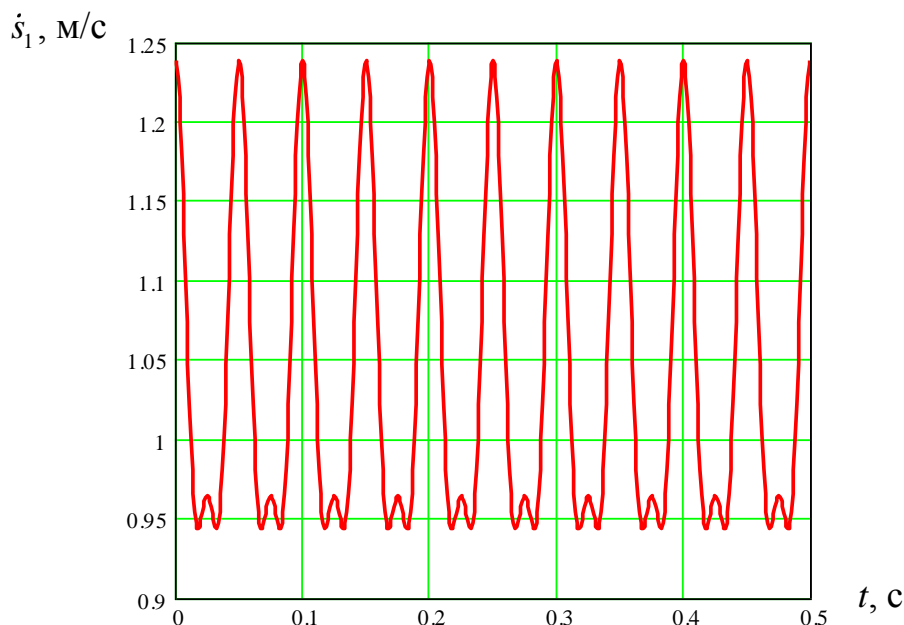


Рис. 5 – Графік зміни швидкості руху виділеного матеріалу відносно гофрованого шнека у гвинтовому конвеєрі в часі $R=100$ мм; $\omega_1=31,4$ рад/с

Висновки. Представлено нову конструкцію гвинтового конвеєра із обертовим кожухом та гофрованим шнеком, що дозволяє керувати режимами транспортування та забезпечувати підвищення інтенсивності змішування матеріалу, що транспортується за рахунок додаткового коливання матеріалу в осьовому напрямку. Досліджено кінематику сипкого матеріалу у гвинтовому конвеєрі із обертовим кожухом та гофрованим шнеком.

Список використаних джерел

1. Василенко П.М. Теория движения частиц по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин / П.М. Василенко. – К. : Издательство УАСХН, 1960. – 284 с.
2. Григорьев А.М. Винтовые конвейеры / А.М. Григорьев. – М. : Машиностроение, 1972. – 184 с.
3. Гевко Б.М. Винтовые подающие механизмы сельскохозяйственных машин / Б.М. Гевко, Р.М. Рогатинский. – Львів : Вища школа, 1989. – 176 с.
4. Рогатинський Р.М. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів / Р.М. Рогатинський, І.Б. Гевко, А.Є. Дячун. - Тернопіль, 2014. – 280 с.
5. Рогатинський Р.М. Дослідження кінематики зернового матеріалу у гвинтовому конвеєрі з обертовим кожухом / Р.М. Рогатинський, А.Є.

- Дячун, А.Р. Вар'ян // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві. – Харків, 2016. – Вип. 168. - С. 24-31.
- 6 Owen P.J. Prediction of screw conveyor performance using the Discrete Element Method (DEM) / P.J. Owen, P.W. Cleary // Powder Technology. – 2009. - Vol. 193. - P. 274–288.
7. Shimizu Y. Threedimensional DEM simulation of bulk handling screw conveyors / Y. Shimizu, P.A. Cundall // J. Engineering Mechanics. - 2001, P. 864–872.

Аннотация

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА В ВИНТОВОМ КОНВЕЙЕРЕ-СМЕСИТЕЛЕ С ОБОРОТНЫМ КОЖУХОМ И ГОФРИРОВАННЫМ ШНЕКОМ

Дячун А.С., Ляшук О.Л., Котык Р.М., Мыхайлюк В.П., Гандзий В.С.

В статье представлена новая конструкция винтового конвейера с оборотным кожухом и гофрированным шнеком для одновременной транспортировки и смешивания сыпучих материалов в животноводстве. Разработанная конструкция позволяет обеспечивать повышение интенсивности смешивания транспортированного материала. Исследована кинематика зернового материала на основе уравнений движения материальных частиц в винтовом конвейере с оборотным кожухом и гофрированным шнеком. Проведен анализ движения материала при установившемся быстрходном режиме.

Abstract

THE STUDY OF BULK MATERIAL KINEMATICS IN A SCREW CONVEYOR-MIXER WITH ROTATING CASING AND CORRUGATED AUGER

Diachun A.Y., Liashuk O.L., Kotyk R.M., Myhailiuk V.P., Gandzii V.S.

The new construction of screw conveyor with rotating casing and corrugated auger for simultaneous transporting and mixing of bulk materials in livestock sector is represented. The developed construction allows providing the increase of intensity of transported material mixing. Based on the equation of motion in a screw conveyor with rotating casing and corrugated auger, the kinematics of bulk material is studied. The motion of bulk material in high-speed operation mode of screw conveyor is analysed.