

ОБҐРУНУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СУШАРКИ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ ПЕРЕМІЩЕННЯ МАТЕРІАЛУ СПІРАЛЕПОДІБНОЮ ПОВЕРХНЕЮ

**Дідух В.Ф., д.т.н., проф., Кірчук Р.В., к.т.н., доцент,
Кокалюк Л.Ю., асистент**

Луцький національний технічний університет

У статті запропоновано конструкцію сушарки із спіралеподібною поверхнею сушильної камери. Отримано аналітичні залежності, що дозволяють обґрунтувати конструктивні параметри внаслідок моделювання переміщення матеріалу в сушильній камері.

Вступ і актуальність проблеми. Штучне сушіння рослинних матеріалів вимагає значних енерговитрат. Сучасна технологія сушіння, як елемент післязбирального обробітку сільськогосподарських матеріалів, потребує удосконалення. Удосконалення сушильної техніки ведеться в основному у трьох напрямках: зниження енерговитрат, підвищення якості виконання операції, підвищення продуктивності сушарок [1, 2].

З іншого боку, розробка нових ефективних засобів сушіння є неможливою без дослідження і застосування енергозберігаючих методів сушіння [3, 4].

Тому дослідження процесу сушіння сільськогосподарських матеріалів, направлені на вирішення проблеми енергозбереження, мають наукове і практичне значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час господарствами використовуються барабанні сушарки вітчизняного виробництва та закордонні зразки колонкових, бункерних та шахтних сушарок періодичної дії. Разом з перевагами ці сушарки мають істотні недоліки. Це і необхідність повторних проходжень матеріалу через сушильну камеру, неефективне використання потенціалу сушильного агента, нерівномірність прогріву матеріалу, недотримання стабільного режиму, низький рівень механізації завантажувально-вивантажувальних робіт.

Для усунення цих негативних явищ запропоновано конструкцію сушарки з спіралеподібною перфорованою поверхнею [5].

Постановка завдання. Метою дослідження є обґрунтування конструктивних параметри сушарки шляхом моделювання переміщення сипкого сільськогосподарського матеріалу поверхнею спіралеподібної форми.

Виклад основного матеріалу. Запропоновано конструктивне виконання сушарки із можливістю контролю часу перебування матеріалу в зоні сушіння (рис. 1). Окрім того, внаслідок обертання сушильної камери відбувається процес постійного перемішування шару матеріалу, що піддається сушінню. Це дозволяє уникнути виникнення застійних зон сушильного агента та дозволяє інтенсифікувати процес сушіння загалом.

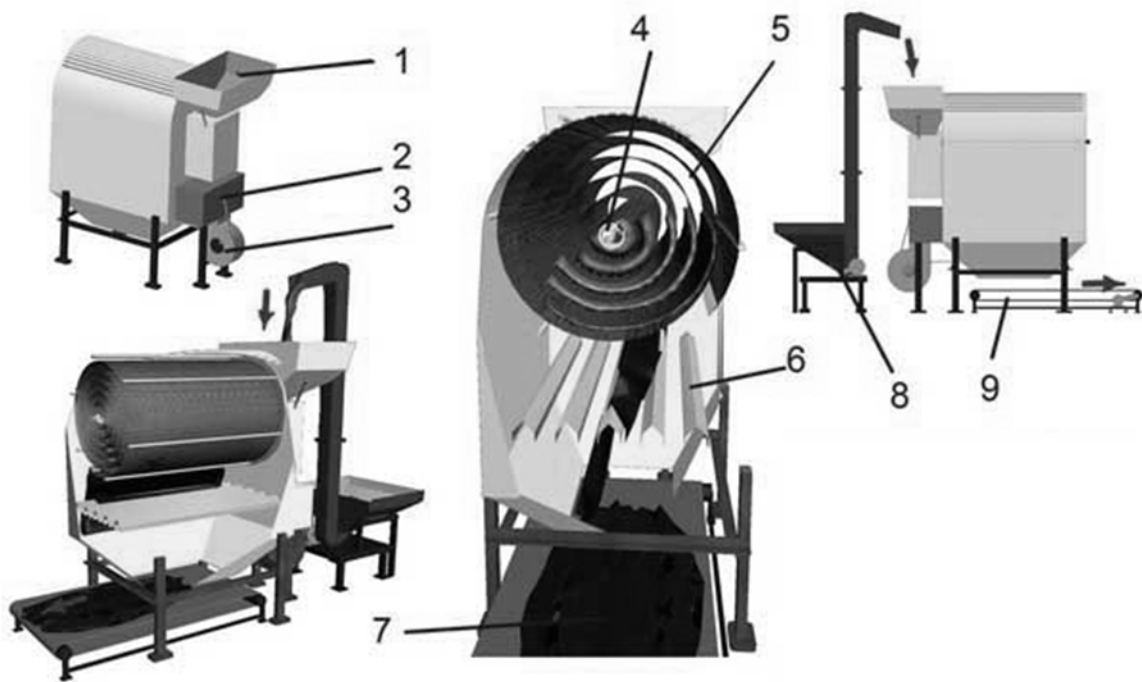


Рис. 1. Схема сушарки з спіралеподібною поверхнею:

1 – завантажувальний бункер; 2 – камера для нагрівання повітря; 3 – вентилятор; 4 – шнек; 5 – спіралеподібна перфорована поверхня; 6 – короб для підведення повітря, 7 – матеріал, що піддається сушінню; 8 – елеватор; 9 – транспортер

Сипкий матеріал елеватором завантажується в бункер, далі шнеком подається в сушильну камеру на виток перфорованої спіралеподібної поверхні. Внаслідок обертання сушильного барабана сипкий матеріал переміщується ковзаючи відносно витків перфорованої поверхні з ярусу на ярус вниз. Це сприяє пересипанню та перемішуванню сипкого матеріалу, що інтенсифікує сушіння. Досягнувши нижнього ярусу доведений до кондиційної вологості сипкий матеріал просипається між коробами і вивантажується через вивантажувальне вікно на транспортер.

Сушильний агент вентилятором від електрокалорифера підводиться в сушильну камеру, проходить через шари сипкого матеріалу на всіх ярусах перфорованої поверхні та підсушує його.

Описавши рух частинки спіралеподібною поверхнею можна розрахувати геометричні параметри сушильної камери та частоту обертання барабана, що забезпечать мінімально необхідний час перебування матеріалу в зоні дії сушильного агента і в результаті отримати раціональні режими роботи.

Плоска крива, розміщена у вертикальній площині Oxy і задана її графіком $r = r(\varphi)$ $\left(\frac{dr}{d\varphi} \geq 0\right)$ у полярній системі координат $Or\varphi$, обертається у своїй площині за годинниковою стрілкою зі сталою кутовою швидкістю ω . У початковий момент часу $t=0$ у деякому місці кривої поміщено матеріальну точку масою m , що знаходиться в спокої відносно абсолютної інерційної системи координат. Коефіцієнт тертя ковзання між матеріальною точкою і

кривою дорівнює f . Прискорення вільного падіння g . Необхідно знайти рівняння руху матеріальної точки.

Приймається допущення, що матеріальна точка не відривається від кривої, і тому розглядатимемо рух цієї точки в неінерційній системі координат, незмінно пов'язаній із заданою кривою. Центр системи відліку у нерухомій точці O . Оскільки траєкторія точки, відповідно до умови задачі задана в полярній системі координат, то введемо у розгляд систему одиничних ортогональних векторів e_r та e_φ , спрямованих відповідно вздовж радіуса-вектора точки (частинки) та перпендикулярно до нього у напрямі відліку полярного кута φ (рис. 2).

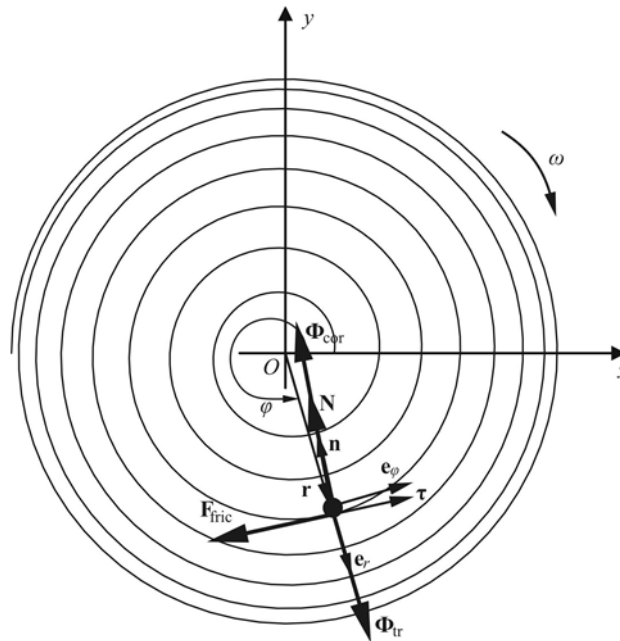


Рис. 2. Схема задачі

Відповідно до [6], $\frac{de_r}{d\varphi} = e_\varphi$, $\frac{de_\varphi}{d\varphi} = -e_r$. Додатково введемо орти натуральної системи координат: нормаль n , спрямовану у напрямі найбільшої увігнутості траєкторії, та дотичну τ . Ці вектори пов'язані із векторами e_r та e_φ залежностями

$$\tau = (r'_\varphi(\varphi)e_r + r(\varphi)e_\varphi)/J(\varphi),$$

$$n = (-r(\varphi)e_r + r'_\varphi(\varphi)e_\varphi)/J(\varphi),$$

де $J(\varphi) = \sqrt{[r(\varphi)]^2 + [r'_\varphi(\varphi)]^2}$ – якобіан;

Штрихами позначено похідні за змінними, що розташовані в індексі, тобто $r'_\varphi = \frac{dr}{d\varphi}$.

Відносна швидкість матеріальної точки, відповідно до означення [7], дорівнює

$$v_{rel} = \frac{dr}{dt} = \frac{d}{dt}(re_r) = \frac{dr}{dt}e_r + r\frac{de_r}{dt} = \dot{\phi}(r'_\phi(\phi)e_r + r(\phi)e_\phi) = \dot{\phi}J(\phi)\tau. \quad (1)$$

Тут $\dot{\phi} = \frac{d\phi}{dt}$ – похідна за часом від полярного кута ϕ , що задає розташування матеріальної точки на її траєкторії.

Відповідно до (1) та означення [7], відносне прискорення матеріальної точки дорівнює

$$a_{rel} = \frac{dv_{rel}}{dt} = \frac{d}{dt}[\dot{\phi}(r'_\phi(\phi)e_r + r(\phi)e_\phi)] = \ddot{\phi}J(\phi)\tau + (\dot{\phi})^2[(r''_\phi(\phi) - r(\phi))e_r + 2r'_\phi(\phi)e_\phi] = \\ = [\ddot{\phi}J(\phi) + (\dot{\phi})^2\alpha(\phi)]\tau + \frac{(\dot{\phi}J(\phi))^2}{\rho(\phi)}n, \quad (2)$$

де $\alpha(\phi) = r'_\phi(\phi)(r''_\phi(\phi) + r(\phi))/J(\phi)$, $\rho = [J(\phi)]^3 / (r(\phi)[r(\phi) - r''_\phi(\phi)] + 2[r'_\phi(\phi)]^2$ – радіус кривини траєкторії.

Переносне (транспортне) прискорення (тобто прискорення, зумовлене обертанням системи координат разом із кривою) для матеріальної точки дорівнює

$$a_{tr} = -\omega^2 r(\phi)e_r \quad (3)$$

і спрямоване до центра O обертання, оскільки кутове прискорення системи координат, незмінно пов'язаної з кривою, відповідно до умови задачі дорівнює нулю ($\omega = const$, $\varepsilon = \dot{\omega} = 0$).

Коріолісове прискорення матеріальної точки обчислимо із урахуванням того, що вектор переносної кутової швидкості, відповідно до умови задачі, дорівнює $\omega_{tr} = \omega[n \times \tau]$. Тобто коріолісове прискорення точки, відповідно до означення [4], дорівнює

$$a_{cor} = 2[\omega_{tr} \times v_{rel}] = 2\omega J(\phi)\dot{\phi}[[n \times \tau] \times \tau] = -2\omega J(\phi)\dot{\phi}[\tau \times [n \times \tau]] = -2\omega J(\phi)\dot{\phi}n. \quad (4)$$

Тут символом « \times » позначено операцію векторного добутку.

Отже, відповідно до (3) і (4) та принципу Даламбера [4] переносна та коріолісова сили інерції дорівнюють

$$\Phi_{tr} = -ma_{tr} = m\omega^2 r(\phi)e_r, \quad \Phi_{cor} = -ma_{cor} = 2m\omega J(\phi)\dot{\phi}n. \quad (5)$$

Окрім сил інерції (5) на матеріальну точку діють:

- нормальна реакція в'язі (кривої)

$$N_a = Nn; \quad (6)$$

- сила тертя ковзання, що відповідно до закону Кулона [7] вважається рівною

$$F_{fric} = -fN \text{sign}(v_{rel} \cdot \tau) = -fN \text{sign}(\dot{\phi})\tau; \quad (7)$$

- сила ваги матеріальної точки, вектор якої у вибраній неінерційній системі координат має вигляд

$$G = mg \left[\sin(\omega t - \varphi) e_r - \cos(\omega t - \varphi) e_\varphi \right]. \quad (8)$$

Відповідно до другого закону Ньютона [7], записаного для неінерційної системи відліку, відносно прискорення матеріальної точки пропорційне до векторної суми активних сил, реакцій в'язей та сил інерції, що діють на неї, тобто

$$ma_{rel} = F_{fric} + G + N_{\dot{a}} + \Phi_{tr} + \Phi_{cor}. \quad (9)$$

Запишемо векторну рівність (9) у проекціях на осі натуральної системи координат, означеної векторами (n, τ) . Для цього помножимо скалярно рівність (9) спочатку на τ , а потім на n із урахуванням таких залежностей:

$$\begin{aligned} n \cdot n &= 1, \quad \tau \cdot \tau = 1, \quad n \cdot \tau = 0, \quad e_r \cdot e_r = 1, \quad e_\varphi \cdot e_\varphi = 1, \quad e_r \cdot e_\varphi = 0, \\ n \cdot e_r &= (-r(\varphi) e_r + r'(\varphi) e_\varphi) / J(\varphi) \cdot e_r = -r(\varphi) / J(\varphi); \\ n \cdot e_\varphi &= (-r(\varphi) e_r + r'(\varphi) e_\varphi) / J(\varphi) \cdot e_\varphi = r'(\varphi) / J(\varphi); \\ \tau \cdot e_r &= (r'(\varphi) e_r + r(\varphi) e_\varphi) / J(\varphi) \cdot e_r = r'(\varphi) / J(\varphi); \\ \tau \cdot e_\varphi &= (r'(\varphi) e_r + r(\varphi) e_\varphi) / J(\varphi) \cdot e_\varphi = r(\varphi) / J(\varphi). \end{aligned}$$

У такий спосіб отримуємо рівняння відносного руху матеріальної точки уздовж кривої $r = r(\varphi)$:

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi} J(\varphi) + (\dot{\varphi})^2 \alpha(\varphi) &= -f \tilde{N} \text{sign}(\dot{\varphi}) + \\ + \frac{g}{J(\varphi)} [r'(\varphi) \sin(\omega t - \varphi) - r(\varphi) \cos(\omega t - \varphi)] &+ \frac{\omega^2 r(\varphi) r'(\varphi)}{J(\varphi)}, \end{aligned} \quad (10)$$

де

$$\begin{aligned} \tilde{N} &= \frac{N}{m} = \frac{(\dot{\varphi} J(\varphi))^2}{\rho(\varphi)} + \frac{[\omega r(\varphi)]^2}{J(\varphi)} - \\ - 2\omega J(\varphi) \dot{\varphi} &+ \frac{g}{J(\varphi)} [r(\varphi) \sin(\omega t - \varphi) + r'(\varphi) \cos(\omega t - \varphi)]. \end{aligned} \quad (11)$$

Якщо матеріальна точка поміщена на криву без початкової швидкості в абсолютній системі координат, то початкові умови задачі, з урахуванням вибраних напрямів відліку кута φ та кутової швидкості ω обертання системи відліку, мають вигляд

$$\varphi(0) = \varphi_0; \quad v_{rel}(0) \cdot e_\varphi(\varphi_0) = \omega r(\varphi_0) \Rightarrow \dot{\varphi}(0) = \omega. \quad (12)$$

Рівняння (10) необхідно розв'язувати з урахуванням умови $\tilde{N} \geq 0$, тобто того, що матеріальна точка не відривається від поверхні кривої.

Диференціальне рівняння (10) є нелінійним диференціальним рівнянням зі змінними коефіцієнтами, тому для його розв'язування використовуються числові методи. Оскільки в (10) присутня розривна функція sign , то для

забезпечення стійкості розв'язку необхідно вибирати числову схему зі сталим кроком. Отже, оптимальним є розв'язування задачі методом Рунге-Кута 4 порядку.

Розроблена модель реалізована у системі MAPLE, а візуалізація отриманих результатів представлена на рис. 3.

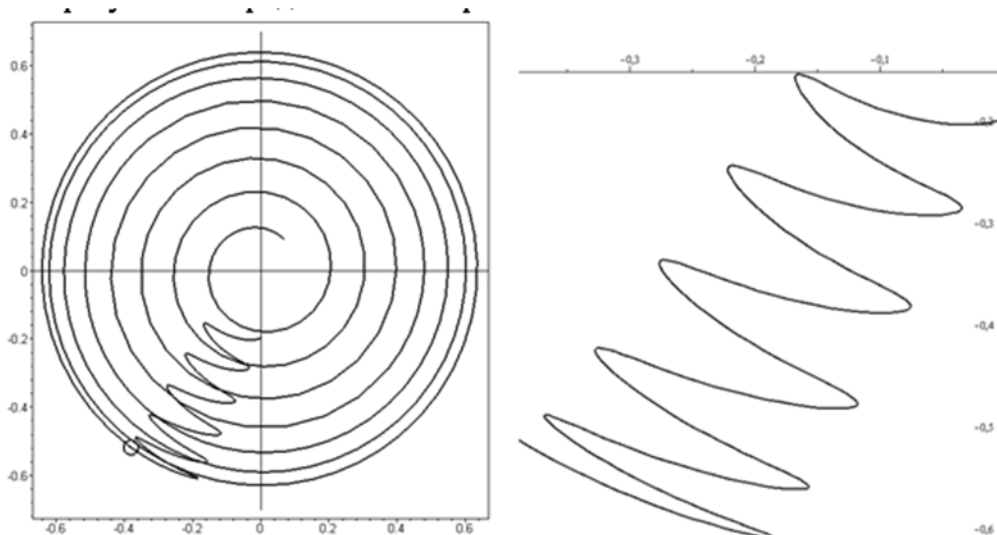


Рис. 3. Траекторія руху частинки спіралеподібною поверхнею

Висновки. Отримана модель дає можливість розрахувати час перебування матеріалу в зоні сушіння і, як наслідок, встановити значення частот обертання для сушіння різних сипких сільськогосподарських матеріалів. Теоретичні викладки перевірені експериментально на виготовленому лабораторному зразку сушарки (рис. 4).



Рис. 4. Загальний вигляд сушарки із спіралеподібною формою сушильної камери

Список використаних джерел

1. Котов Б.И. Технологические и теплоэнергетические основы повышения эффективности сушки растительного сырья: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / УААН, Ин-т механизации и электрификации с.х. / Борис Иванович Котов. – Глеваха, 1994. – 440 с.
2. Лісецький В. О. Підвищення ефективності сушіння зерна в сушарках періодичної дії: Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.05.11 “Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва” / В. О. Лісецький. – Глеваха, 2004. – 18 с.
3. Зеленко В.И. Конвективная сушка сельскохозяйственных материалов в плотном слое: Основы теории / В.И. Зеленко. – Тверь: Обл. кн.-журн. изд-во, 1998. – 96 с.
4. Дідух В.Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських матеріалів: Монографія / Володимир Федорович Дідух. – Луцьк: ЛДТУ, 2002. – 165 с.
5. Пат. № 85766 Україна, МПК (2009) F26 B11/00. Барабанна сушарка / Дударев І.М., Кірчук Р. В., Кокалюк Л.Ю.; заявник і власник патенту Луцький державний технічний університет. – № а200706074; заявл. 01.06.2007р.; опубл. 25.02.2009, Бюл. №4.
6. Смирнов В. И. Курс высшей математики / В. И. Смирнов. – М.: ГИФМЛ, 1962. – Т. 1. – 478 с.
7. Маркеев А. П. Теоретическая механика: Учебник для университетов / А. П. Маркеев. – М.: ЧеРо, 1999. – 572 с.

Аннотація

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СУШИЛКИ ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛА СПИРАЛЕОБРАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Дідух В.Ф., Кірчук Р.В., Кокалюк Л.Ю.

В статье предложено конструкцию сушилки со спиралеобразной поверхностью сушильной камеры. Получены аналитические зависимости, позволяющие обосновать конструктивные параметры вследствие моделирования перемещения материала в сушильной камере.

Abstract

RATIONALE FOR THE PARAMETERS DRYERS BY MODELLING OF MATERIAL MOVING IN DRYER WITH SPIRAL SURFACE

Volodymyr Didukh, Ruslan Kirchuk, Kokalyuk Lyudmila

The article suggested that the construction of the dryer with a spiral surface of the drying chamber. Analytical dependences the design parameters by modelling of material moving in dryer with spiral surface.