

Цуркан О. В.

Герасимов О. О.

Солона О. В.

*Вінницький
державний
аграрний
університет*

Величко Л. Д.

*Львівський
державний
університет
безпеки
життєдіяльності*

УДК 621.9.048

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ РУХУ РОБОЧОЇ КАМЕРИ ЕНЕРГООЩАДНОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ СУШАРКИ

В статтє описана конструкция, принцип работы вибрационной сушилки для фильтрационно-конвективной сушики семян тыквы. Представлена расчетная схема и законы движения этой системы в виде уравнений Лагранжа II-го рода.

In clause the design, a principle of work of a vibrating dryer for drying of seeds of a pumpkin is described. The settlement scheme and laws of movement of this system in the form of Lagrange equations II-th sort is presented.

Актуальність роботи. Процеси сушіння різних матеріалів мають місце у більшості сучасних технологічних процесів. Разом із задачами прискорення процесу та підвищення його якісних показників існує актуальне завдання зменшення енергозатрат на його здійснення. Цього можна досягти шляхом розробки і створення енергоощадного обладнання та технологій.

Аналіз дослідження публікацій. Результати експериментальних та теоретичних досліджень процесу сушіння високовологого насіння баштанних та овочевих культур висвітлені в роботах [1, 2]. Аналіз робіт по розробці сушарок показав, що значної економії енергетичних затрат можна досягти при використанні вібраційного поля в поєднанні із механічною дією [3].

Доцільність та ефективність застосування вібраційного обладнання в процесах сушіння сільгосппродукції обґрунтовані в роботах [4, 5]. Про вагомий вплив вертикальних переміщень робочої камери на інтенсивність процесів фільтрування та конвективного сушіння наголошується в [5, 6].

Попередні дослідження засвідчили, що домінуючий вплив на швидкість процесу фільтраційного видалення вологи-фільтрату та сушіння здійснюють вертикальні складові вібрацій U-подібного днища робочої камери, збільшення амплітуди яких, як правило,

супроводжується зростанням і горизонтальної складової, що в цілому спричиняє додаткові енергозатрати.

Метою роботи є теоретичне дослідження законів руху системи «вібробуджувач – робоча камера» з метою інтенсифікації процесу фільтраційного вологовидалення та конвективного сушіння насіння гарбуза.

Основний зміст роботи. У лабораторії кафедри АКМ ТП Вінницького державного аграрного університету було розроблено та виготовлено комплекс обладнання, основою якого став дослідно-промисловий зразок вібраційної сушарки, оснащений спеціальним пристроєм фільтраційного вологовидалення [7, 8]. Принципова схема вібраційної сушарки з пристроєм вологовидалення представлена на рис. 1.

Вібраційна сушарка складається з U – подібної робочої камери 1, яка за допомогою пружин 2 встановлена на нерухомій основі і оснащена дебалансним вібробуджувачем 3 та двома газорозподільчими решітками, одна з яких виконана у вигляді пустотілого циліндра 4 з перфорованою поверхнею, розміщеного по горизонтальній осі сушильної камери 1 в шарі насіння 5, яке висушується. Циліндр 4, на якому симетрично і жорстко закріплено дві П-подібні лопаті 6 з еластичними скребками 7, з однієї торцевої сторони, яка виходить за межі

сушильної камери 1, за допомогою пружно-поворотного еластичного з'єднання 8 з'єднаний з системою подачі, відбору та формування сушильного агента 9, а з протилежної – приводом, який забезпечує його обертальний рух. Простір між циліндром 4, який не

коливається і робочою камерою 1, яка зазнає вібрацій, герметизовано пружними вставками 10. Перфороване днище робочої камери 1 жорстко з'єднане з газорозподільчим коробом – дифузором 11.

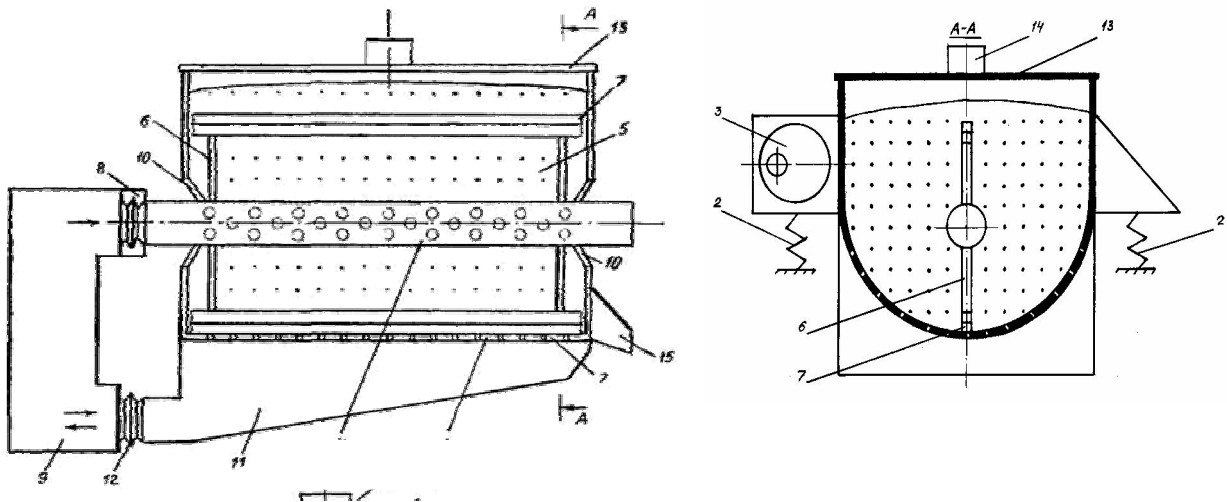


Рис. 1. Конструктивна схема вібраційної сушарки для фільтраційно-конвективного сушіння насіння гарбуза: 1-робоча камера; 2-пружины; 3-віброзбудувач дебалансний; 4-пустотілий циліндр; 5-насіння; 6-лопати; 7-скребки; 8, 12-з'єднання еластичне; 9-агент сушильний; 10-пружні вставки; 11-дифузор; 13-панель верхня; 14-отвір завантажувальний; 15-лоток розвантажувальний.

Робоча камера 1 у верхній панелі 13 має завантажувальний отвір 14, а на рівні днища – розвантажувальний лоток 15.

Сушарка працює наступним чином. Від віброзбудувача 3, вал якого обертається із кутовою швидкістю ω в кругові коливання в вертикальній площині передаються U-подібній робочій камері 1. На першому етапі процесу підігрітий сушильний агент (+35°C) через перфоровану бокову поверхню пустотілого циліндра подається в шар насіння 5, проходить через нього зверху-вниз і проникає через перфороване днище сушильної камери 1 в дифузор 11, в якому створюється розрідження.

На другому етапі підігрітий сушильний агент (+50°C) через перфороване днище сушильної камери 1 подається в шар насіння 5, проходить через нього знизу-вверх і видаляється з сушильної камери.

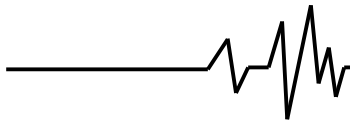
За рахунок фільтраційних процесів, вібрації, взаємодії з рухомим підігрітим сушильним агентом та внаслідок розрідження в дифузорі 11 поверхнева волога з насіння 5 інтенсивно видаляється разом з сушильним агентом через перфороване днище сушильної камери 1. Дві П-подібні лопаті з еластичними скребками, які приводяться в обертальний рух

разом з перфорованим валом – зовнішнім окремим приводом, забезпечують очистку перфорованих поверхонь сушильної камери від залишків насіння та фільтрату і додатково перемішують оброблюваний матеріал.

Інтенсифікації процесу фільтраційного вологовидалення сприяє переміщення сушильного агента в напрямку природного переміщення вологи, тобто зверху-вниз.

На другому етапі процесу після видалення поверхневої вологи відбувається конвективне сушіння насіння за рахунок продувки підігрітого сушильного агента через перфороване днище і насіння 5, порозність якого внаслідок попередніх підготовчих операцій значно підвищується, а когезивно-адгезивні властивості знижуються. Це дає змогу збільшити швидкість подачі та температуру сушильного агента і тим самим значно інтенсифікувати тепломасообмінний процес при дотриманні кінцевих якісних показників продукції та суттєвому зниженні енергозатрат при сушінні високовологої, здатної до злипання та налипання продукції.

Проведені дослідження свідчать, що значно інтенсифікувати процес без суттєвого збільшення енергозатрат можна шляхом



забезпечення оптимального режиму вібрацій, зокрема, посилення вертикальної складової коливань днища робочої камери. Для цього необхідно провести математичний аналіз силових та кінематичних параметрів системи.

З цією метою складаємо математичну модель [9, 10] та розрахункову схему даної

машини (рис. 2).

Робочий орган сушарки – камера 1 встановлена на рамі 2 через пружини 3. Коливний рух камери у вертикальній площині забезпечує дебалансний вібробудувач 4, який закріплений на зовнішній стінці камери.

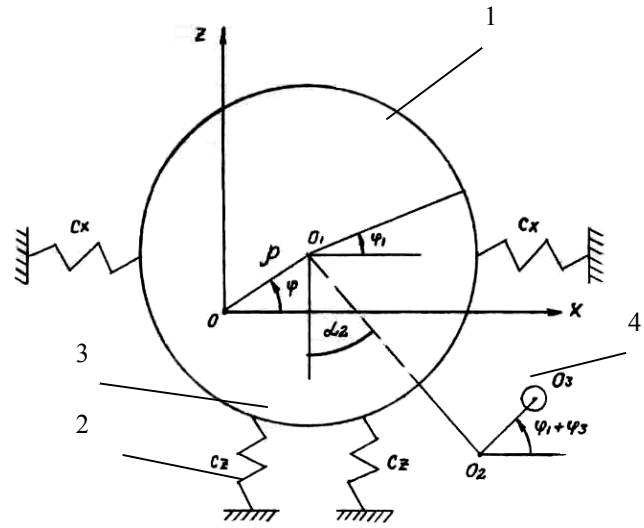


Рис. 2. Розрахункова схема вібраційної сушарки для фільтраційно-конвективного сушіння насіння гарбуза: 1-камера; 2-рама; 3-пружини; 4-вібробудувач дебалансний.

Вводимо позначення:

- O_{xz} – нерухома система координат;
- O_1 – центр мас камери;
- ρ і φ – координати центра мас камери (полярні);
- φ_1 – кут обертання камери;
- m_k – маса камери;
- I_k – момент інерції камери відносно центра мас камери (осі, що проходить вздовж центрів мас вертикальних перерізів камери);
- m_g ; I_g – маса дебаланса і момент інерції дебаланса відносно центра мас дебаланса;
- α_2 – кут відхилення від вертикального діаметра осі обертання дебаланса.
- $l_2 = O_1O_2$ - віддаль від центра мас камери до осі обертання дебаланса;
- $l_3 = O_2O_3$ – віддаль від осі обертання дебаланса до його центра мас.

Прийmemo слiдуючі допущення:

- робочий контейнер є жорстким, твердим, недеформівним тілом;
- кутова швидкість обертання дебаланса стала;
- вплив маси завантаження враховується через коефіцієнт приєднаної маси.

Дана механічна система має чотири ступеня вільності. Використаємо для визначення характеру руху механічної системи рівняння Лагранжа другого роду.

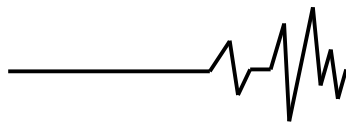
Камера здійснює плоский рух. Отже, кінетична енергія становить:

$$T_k = \frac{m_k}{2} \left(\dot{\rho}^2 + \rho^2 \cdot \dot{\varphi}^2 \right) + \frac{I_k}{2} \cdot \dot{\varphi}_1^2 \quad (1)$$

Дебаланс здійснює плоский рух. Його кінетична енергія визначається:

$$T_g = \frac{m_g}{2} \left[\dot{\rho}^2 + \rho^2 \dot{\varphi}^2 + \dot{\varphi}_1^2 l_2^2 + \left(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_3 \right)^2 l_3^2 + 2 \dot{\rho} \dot{\varphi}_1 l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \alpha_2) + 2 \dot{\rho} \left(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_3 \right) l_3 \cdot \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_3) + 2 \rho \dot{\varphi} \dot{\varphi}_1 l_2 \sin(\alpha_2 + \varphi_1 - \varphi) + 2 \rho \dot{\varphi} \left(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_3 \right) l_3 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_3) + 2 \dot{\varphi}_1 l_2 \left(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_3 \right) l_3 \sin(\alpha_2 - \varphi_3) \right] + \frac{I_g \left(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_3 \right)^2}{2} \quad (2)$$

Отже, кінетична енергія механічної системи враховуючи (1) і (2) дорівнює:



$$T = \frac{m_k}{2} \left(\dot{\rho}^2 + \rho^2 \dot{\varphi}^2 \right) + \frac{I_k}{2} \dot{\varphi}_1^2 + \frac{m_g}{2} \left[\dot{\rho}^2 + \rho^2 \dot{\varphi}^2 + \dot{\varphi}_1^2 l_2^2 + \left(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_3 \right)^2 l_3^2 + 2 \dot{\rho} \dot{\varphi}_1 l_2 \cdot \cos(\varphi - \varphi_1 - \alpha_2) + 2 \dot{\rho} \left(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_3 \right) l_3 \cdot \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_3) + 2 \rho \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_3 l_2 \sin(\alpha_2 + \varphi_1 - \varphi) + 2 \rho \dot{\varphi} \left(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_3 \right) l_3 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_3) + 2 \dot{\varphi}_1 l_2 \left(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_3 \right) l_3 \sin(\alpha_2 - \varphi_3) \right] + \frac{I_g \left(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_3 \right)^2}{2}. \quad (3)$$

Узагальнюючі сили по координатах:

$$Q_\rho = -(P_k + P_g) \sin \varphi - c_z \rho \sin^2 \varphi - c_x \rho \cos^2 \varphi + c_z \delta_{cm} \sin \varphi = -(c_x \cos^2 \varphi + c_z \sin^2 \varphi) \rho$$

$$Q_\varphi = -(P_k + P_g) \rho \cos \varphi + (c_x - c_z) \rho^2 \sin \varphi \cos \varphi + c_z \delta_{cm} \rho \cos \varphi = (c_x - c_z) \rho^2 \sin \varphi \cos \varphi;$$

$$Q_{\varphi_1} = -c_{\varphi_1} \varphi_1 - P_g (l_2 \sin(\alpha_2 + \varphi_1) + l_3 \cos(\varphi_1 + \varphi_3)),$$

$$Q_{\varphi_3} = M_{em} - M_{on} - P_g l_3 \cos(\varphi_1 + \varphi_3).$$

Враховуючи вище отримані результати рівняння Лагранжа II-го роду для даної механічної системи наберуть вигляду:

$$1. \left\{ \begin{aligned} & (m_k + m_g) \ddot{\rho} - m_k \rho \dot{\varphi}^2 + m_g [-\rho \dot{\varphi}^2 + \ddot{\varphi}_1 l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \alpha_2) + \left(\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_3 \right) l_3 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_3) + \\ & + \dot{\varphi}_1^2 l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \alpha_2) - \left(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_3 \right)^2 l_3 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_3)] = -(c_x \cos^2 \varphi + c_z \sin^2 \varphi) \rho; \end{aligned} \right.$$

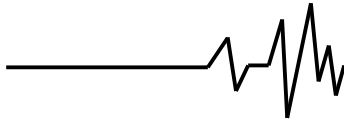
$$2. \left\{ \begin{aligned} & (m_k + m_g) \rho^2 \ddot{\varphi} + 2(m_k + m_g) \rho \dot{\rho} \dot{\varphi} + m_g [\rho \ddot{\varphi}_1 l_2 \sin(\alpha_2 + \varphi_1 - \varphi) + \rho \dot{\varphi}_1^2 l_2 \cos(\alpha_2 + \varphi_1 - \varphi) + \\ & + \rho \left(\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_3 \right) l_3 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_3) + \rho \left(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_3 \right)^2 l_3 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_3)] = (c_x - c_z) \rho^2 \sin \varphi \cos \varphi; \end{aligned} \right.$$

$$3. \left\{ \begin{aligned} & I_k \ddot{\varphi}_1 + I_g \left(\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_3 \right) + m_g [\ddot{\varphi}_1 l_2^2 + \left(\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_3 \right) l_3^2 + \ddot{\rho} l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \alpha_2) + \ddot{\rho} l_3 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_3) + \\ & + \rho \ddot{\varphi}_1 l_2 \sin(\alpha_2 + \varphi_1 - \varphi) + \rho \ddot{\varphi}_3 l_3 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_3) + \left(2 \ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_3 \right) l_2 l_3 \sin(\alpha_2 - \varphi_3) - \\ & - 2 \dot{\rho} \dot{\varphi}_1 l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \alpha_2) + 2 \dot{\rho} \dot{\varphi}_3 l_3 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_3) - \rho \dot{\varphi}^2 l_2 \cos(\alpha_2 + \varphi_1 - \varphi) - \\ & - \rho \dot{\varphi}^2 l_3 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_3) - \left(2 \dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_3 \right) \dot{\varphi}_3 l_2 l_3 \cos(\alpha_2 - \varphi_3)] = \\ & = -c_{\varphi_1} \cdot \varphi_1 - m_g \cdot g (l_2 \sin(\alpha_2 + \varphi_1) + l_3 \cos(\varphi_1 + \varphi_3)); \end{aligned} \right.$$

$$4. \left\{ \begin{aligned} & I_g \left(\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_3 \right) + m_g \left[\left(\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_3 \right) l_3^2 + \ddot{\rho} l_3 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_3) + \rho \ddot{\varphi}_3 l_3 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_3) + \right. \\ & + \ddot{\varphi}_1 l_2 l_3 \sin(\alpha_2 - \varphi_3) + 2 \dot{\rho} \dot{\varphi}_3 l_3 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_3) + \dot{\varphi}_1^2 l_2 l_3 \cos(\alpha_2 - \varphi_3) - \\ & \left. - \rho \dot{\varphi}^2 l_3 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_3) \right] = M_{ai} - \dot{I}_{ir} - P_g l_3 \cos(\varphi_1 + \varphi_3); \end{aligned} \right.$$

Розв'язок отриманих рівнянь дозволить перевірити адекватність розробленої математичної моделі результатам експериментальних досліджень та оптимізувати технологічні параметри процесу.

Запропоновані технічні рішення дозволяють здійснити процес сушіння високовологого насіння гарбуза, яке має на початковому етапі підвищені когезивно-адгезивні властивості зі значним зниженням



питомих енергозатрат при збереженні товарних показників якості насіння.

Попередні експериментальні дослідження свідчать, що посилення вертикальної складової еліптичних коливань днища сушильної камери, забезпечені вибором оптимальних параметрів вібробуджувача, сприяють інтенсивному видаленню фільтрату, руйнації кірки на перфорованих поверхнях, створенню додаткового пульсуючого розрідження, що в підсумку дозволяє мінімізувати вплив негативних факторів. Зокрема, порівняно з конвективним сушінням в нерухомому насипу запропонована технологія та обладнання дозволяє знизити питомі енергозатрати в 4,4 рази з $19 \cdot \text{МДж/кг} \cdot 1\%$ до $4,3 \text{МДж/кг} \cdot 1\%$ [11].

Список використаних джерел

1. Голубкович А.В., Чижиков А.Г. Сушка высоковлажных семян и зерна. – М.: Росагропромиздат, 1991. – 235с.
2. Голубкович А.В. Теория и технология сушки семян овощных и бахчевых культур. – М.: Агропромиздат, 1987 – 223с.
3. Берник П.С., Паламарчук И.П., Зозуляк И.А. Анализ конструкций вибрационных сушилок для сыпучей сельскохозяйственной продукции // Вибрации в технике и технологиях. – 1998. №2. – С. 15-21.
4. Гинзбург А.С., Резчиков В.А. Сушка пищевых продуктов в кипящем слое. – М.: Пищевая промышленность. 1966. – 196 с.
5. Членов В.А., Михайлов Н.В. Сушка сыпучих материалов в виброкипящем слое. – М.: Строиздат. 1967. – 224с.
6. Варсановьев В.Д., Кольман-Иванов Э.Э. Вибрационная техника в химической промышленности. – М.: Химия. – 240 с.
7. Берник П.С., Цуркан О.В., Герасимов О.О. Оптимізація ресурсозберігаючої технології вібраційного сушіння високовологого насіння// Збірник наукових праць Таврійської державної агротехнічної академії. (випуск 44). – Мелітополь: ТДАА, 2006. – С. 3-10.
8. Берник П.С., Цуркан О.В., Герасимов О.О. Енергоощадна технологія вібраційного сушіння насіння баштанних культур. // Вісник Харківського НТУСГ ім. П. Василенка «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних та харчових виробництв» (випуск 45). – Харків. – 2006. – С. 180-192.
9. Серета Л.П., Берник П.С., Цуркан О.В., Величко Л.Д. Математична модель вібраційного змішувача із неколивним лопатевим валом та подвійним маятковим віброімпульсним приводом// Вибрации в технике и технологиях. – 2003. №6. – С. 18-22.
10. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
11. Цуркан О.В., Герасимов О.О. Застосування вібраційного обладнання в процесі сушіння насіння гарбуза // Техніка АПК. – 2008. № 3-4. – С. 21-22.