

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ВЕРТИКАЛЬНОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ СУШИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розроблена нова принципова схема вертикальної вібраційної сушильної установки, силовим приводом якої є гідропривід циклічної дії, що дистанційно керується гідравлічним генератором зміни тиску робочої рідини, запропонована математична модель динаміки робочого процесу, яка надає можливість провести аналіз складових робочого процесу, що впливають на тривалість сушіння та його якість.

Ключові слова: сушильна установка, гідропривід циклічної дії, генератор зміни тиску, математична модель, робочий процес

Abstract

A new principle scheme of a vertical vibration drying plant is developed, the force drive of which is a hydraulic drive of a cyclic action, which is remotely controlled by a hydraulic generator for changing the pressure of the working fluid, a mathematical model of the dynamics of the working process is proposed, which provides an opportunity to analyze the components of the working process, affecting the duration of drying and its quality.

Key words: drying plant, hydraulic drive of cyclic action, pressure generator, mathematical model, work process

Вступ

В багатьох галузях промисловості та сільського господарства достатньо важливу роль при виготовленні якісної продукції відіграють процеси сушіння різноманітних матеріалів. Внаслідок недостатнього чи надлишкового висушування готова продукція втрачає багато своїх споживчих характеристик або навіть передчасно псується [1,2].

При проектуванні машин для сушіння, найбільш важливою є проблема зниження питомих енерговитрат. Створення нових конструкцій високопродуктивних сушильних установок, які характеризуються достатнім рівнем економічності, надійності і якості вихідної продукції є актуальною задачею.

Відомо цілий ряд науково-дослідних робіт присвячених загальній теорії сушіння, тепломасообміну та інтенсифікації процесів сушіння. Аналіз проведених досліджень показав, що серед відомих сушильних установок, одними з найбільш перспективними є установки з віброкиплячим шаром. Сушильні установки подібної конструкції дозволяють висушувати матеріал під час його транспортування і відрізняються високою ефективністю і якістю процесу сушіння, а також скороченням тривалості сушіння за рахунок посиленого перемішування матеріалу в сушильній камері. Їх застосування є найбільш доцільним для сушіння цілого ряду сипких, схильних до злипання і навіть пастоподібних матеріалів [2,3].

В НДЛ гідродинаміки ВНТУ розроблено новий дослідно-промисловий зразок вертикальної вібраційної установки для сушіння гранульованої, дрібнодисперсної і пилоподібної продукції (Рисунок). Необхідно розробити узагальнену його математичну модель. За допомогою цієї моделі стане реальним провести аналіз всіх складових, що характеризують конструктивні та динамічні параметри установки, а також стане можливим обґрунтувати вибір таких взаємозв'язків і співвідношень між робочими характеристиками та параметрами, які забезпечуватимуть надійне функціонування устаткування та отримання якісної вихідної продукції при відносно невеликих енергетичних витратах.

Результати досліджень

Важливими характеристиками будь-якої віброосушарки, що суттєво впливають на якість сушіння сипкого матеріалу, окрім температурної дії гарячого повітря, яке нагнітається в зону сушіння, є амплітуда і частота коливань.

Для підвищення ефективності та економічності роботи апаратів такого типу, перспективним є використання гідро- і пневмоприводів, що мають ряд істотних переваг над іншими типами приводів і допускають плавне регулювання частоти і амплітуди коливань. Цим забезпечується їх універсальність і можливість використання для транспортування різноманітних за характеристиками матеріалів [3].

На рисунку показано вертикальний вібраційний сушарку [4], який була спроектована і виготовлена в науково-дослідній лабораторії гідродинаміки Вінницького національного технічного університету (ВНТУ). Цей установка дозволяє у широких межах регулювати робочі характеристики (температуру сушильного агента, подачу сушильного агента, амплітуду і частоту коливань).

Установка працює так. В сушильну камеру 1, що складається з теплоізолюваного захисного кожуха 2 та циліндричного корпусу 3, навколо якого влаштована спіральної перфорована стрічка 4, на яку в нижній частині по впускному шиберу 10 надходить сипкий матеріал. Завдяки періодичній дії підпружиненого виконавчого плунжерного гідроциліндра-вібратора 5, управління якого здійснюється гідравлічним генератором коливаль тиску робочої рідини 7, відбувається складний просторовий спільний рух корпусу 3 і сипкого матеріалу, що знаходиться на поверхні його спіральної перфорованої стрічки 4. Під дією тиску рідини, що надходить від насоса 8 до робочої камери виконавчого плунжерного гідроциліндра-вібратора 5 відбувається одночасне переміщення вгору і поворот на необхідний кут корпусу 3. При цьому здійснюється деформування силових пружних елементів - пластинчастих пружин 6 і при досягненні у привідній гідросистемі розрахункового тиску робочої рідини відбувається спрацювання гідравлічного генератора коливаль робочої рідини 7 і напірна магістраль з'єднується зі зливом. Тиск робочої рідини падає до мінімального зливного. Під дією потенціальної енергії акумульованої у деформованих напередодні силових пружних елементах пластинчастих пружинах 6 корпус 3 повертається у вихідне положення. В результаті періодичних коливаль навколо центральної вертикальної осі установки буде здійснюватися транспортування сипкого матеріалу вздовж спіральної перфорованої стрічки 4 від нижньої до верхньої частини корпусу 3. Матеріал під час кожного робочого ходу буде підкидатися вгору, тобто відриватися від спіральної перфорованої стрічки 4, а потім здійснюватиме вільне падіння. Утримуюча його поверхня стрічки за цей час повертатиметься на вихідну позицію. Таким чином, сипкий матеріал за кожен робочий цикл коливаль буде зміщуватися на певну визначену відстань. Частинки сипкого матеріалу, завдяки вібраційному транспортуванню переміщуватимуться відносно спіральної перфорованої стрічки 4 і надходитимуть до її верхньої частини, а далі до виходу через випускний шибер 11 за межі установки. Під час здійснення відриву від утримуючої поверхні в утворений проміжок між стрічкою та сипким матеріалом надходитиме гаряче повітря, яке і буде інтенсивно сушити цей матеріал.

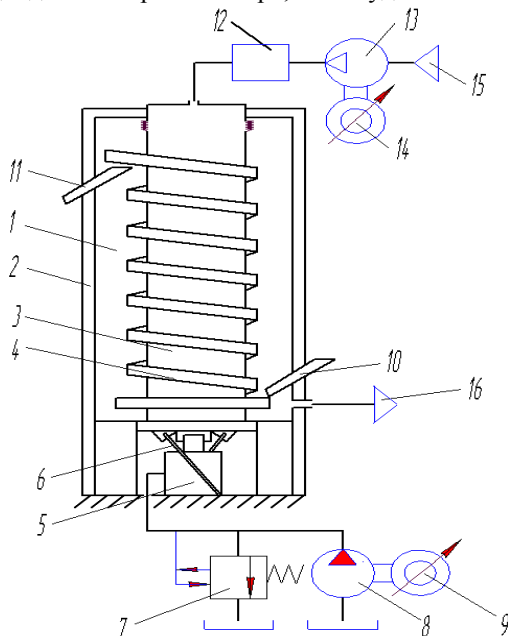


Рисунок. Принципова схема вертикальної вібраційної сушильної установки

Шар сушильного матеріалу додатково буде також приводитися у інтенсивний киплячий стан потоком сушильного агента – гарячого повітря, що надходить від калорифера 12. В калорифер 12 повітря подається вентилятором 13 з приводом від керованого електродвигуна змінного струму 14, який всмоктує повітря із навколишнього середовища вхідним пристроєм сушильного агента 15.

В сушильну камеру 1 сушильний агент подається по корпусу 3 через систему отворів, що дає можливість підвищити питому теплову характеристику, цим самим зменшити енерговитрати установки.

Температурний режим сушіння залежить від властивостей висушуваного матеріалу і умов технологічного процесу його проходження. Щоб операція сушіння була інтенсивною і економічною, початкову температуру сушильного агента приймають максимальною в межах, що є можливими для даного сипкого матеріалу.

При інтенсивному перемішуванні забезпечується рівномірне нагрівання та сушіння окремих часток оброблюваного матеріалу, тобто відбувається активний процес тепловологообміну. В результаті цього сипкий матеріал швидко та рівномірно сушиться.

Сушіння відбувається як конвективним, так і кондуктивним шляхом. В той момент, коли частинки сипкого матеріалу знаходяться в польоті між окремими циклами вібротранспортування, так і безпосередньо, завдяки контакту із нагрітою поверхнею спіральної перфорованої стрічки 4, через яку проходить гаряче повітря.

Відпрацьований сушильний агент, що пройшов крізь сипкий матеріал через викидний пристрій сушильного агента 16, потрапляє в навколишнє середовище або до проміжної системи рекуперації теплової енергії. Температура відпрацьованих газів обумовлюється економічними міркуваннями і заданою кінцевою вологістю сипкого матеріалу.

Для аналітичного опису робочого процесу цієї системи нами розроблена математична модель, яка дозволяє визначити основні робочі характеристики вертикальної вібраційної сушильної установки.

При складанні диференціальних рівнянь, що описують математичну модель гідроприводу були зроблені наступні основні припущення: температура і в'язкість робочої рідини змінюються незначно; хвильовими процесами нехтуємо з огляду на невелику протяжність трубопроводів; механічна характеристика привідного

електродвигуна приймається лінійною; коефіцієнт стисливості β , який характеризує сумарний ефект стисливості робочої рідини і деформації з'єднувальних трубопроводів приймається постійним; спрацювання клапана-пульсатора вважається релейним, тобто таким, що відбувається за короткий час в порівнянні з часом прямого чи зворотного ходу; при відкриванні запірно-регулювального органу генератора коливань тиску площа його прохідного перерізу змінюється релейно від 0 до f_{3i} ; тиск на зливі приймається постійним, тривалістю гальмування в кінці прямого і зворотного ходу з огляду на його досить малу величину нехтуємо; продуктивність Q_n гідронасоса приймається постійною, тобто незалежною від величини тиску в гідросистемі; втрати в гідросистемі не враховуються внаслідок їх малої величини; транспортований матеріал приймається абсолютно жорстким.

Фаза прямого ходу описується рівняннями руху транспортуючого органу сумісно з транспортованим матеріалом вверх у проекціях на горизонтальну і вертикальну осі

$$M \frac{d^2 x_1}{dt^2} + \mu \frac{dx_1}{dt} + c x_1 = p F_{i\bar{e}} \sin \alpha, \quad (1)$$

$$M \frac{d^2 y_1}{dt^2} + \mu \frac{dy_1}{dt} + c y_1 = p F_{i\bar{e}} \cos \alpha - Mg, \quad (2)$$

і рівнянням зв'язку, отриманим з умови нерозривності потоку в гідросистемі:

$$Q_i = F_{i\bar{e}} \sqrt{\left(\frac{dx_1}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy_1}{dt}\right)^2} + p \left(W_a + F_{i\bar{e}} \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \right) \beta. \quad (3)$$

В рівняннях (1) – (3) позначено: $M = m_1 + m_2$ – сумарна маса транспортуючого органу m_1 і маси матеріалу на ньому m_2 ; $\frac{d^2 x_1}{dt^2}$, $\frac{dx_1}{dt}$, x_1 і $\frac{d^2 y_1}{dt^2}$, $\frac{dy_1}{dt}$, y_1 – відповідно проекції на горизонтальну і вертикальну осі прискорення, швидкості і переміщення центру ваги транспортуючого органу; μ – коефіцієнт в'язкого демпфування; c – жорсткість пружних елементів; p – поточний тиск в гідросистемі; $F_{i\bar{e}}$ – ефективна робоча площа плунжера; W_a – об'єм гідросистеми; g – прискорення вільного падіння.

Фазу зворотного ходу можна представити відповідно рівняннями:

- руху транспортуючого органу вниз окремо від транспортованого вантажу в проекціях на горизонтальну і вертикальну осі:

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + \mu \frac{dx_1}{dt} + c x_1 = c x_{10} - p F_{i\bar{e}} \sin \alpha, \quad (4)$$

$$m_1 \frac{d^2 y_1}{dt^2} + \mu \frac{dy_1}{dt} + c y_1 = c y_{10} + m_1 g - p F_{i\bar{e}} \cos \alpha; \quad (5)$$

- витрати з робочої порожнини і гідросистеми на злив через прохідний переріз клапана-пульсатора:

$$\sigma \sqrt{p - p_{\varphi\bar{e}}} = Q_i + F_{i\bar{e}} \sqrt{\left(\frac{dx_1}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy_1}{dt}\right)^2} + p \left[W_a + F_{i\bar{e}} \left(\sqrt{x_{10}^2 + y_{10}^2} - \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \right) \right] \beta; \quad (6)$$

- вільного падіння транспортованого матеріалу:

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = 0, \quad m_2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} = 0 \quad (7), (8)$$

В рівняннях (4) - (8) введені додаткові позначення: x_{10} і y_{10} – величина зміщення транспортуючого органу в фазі прямого ходу; $\sigma = k f_{\varphi\bar{e}} \sqrt{2/\rho}$ – гідропровідність прохідного перерізу клапана-пульсатора, де k – коефіцієнт витрати; ρ – густина робочої рідини; $\frac{d^2 x_2}{dt^2}$, $\frac{d^2 y_2}{dt^2}$ – відповідно проекції прискорення центра мас транспортованого матеріалу.

Таблиця. **Технічні характеристики вібраційної сушарки**

Продуктивність сушіння, кг/год	65
Потужність калорифера, кВт	3
Температура сушильного агента, °C	20 - 120
Подача сушильного агента, м³/хв.	2 - 5
Амплітуда, мм	0,5 – 8
Частота робочих ходів, Гц	10 – 20
Питомі витрати енергії на вібротранспортування, Вт/кг	45
Питомі витрати енергії на подачу сушильного агента, Вт/кг	18

Питомі витрати енергії на нагрів теплоносія, Вт/кг	при 120 °С – 125 при 80 °С – 95 при 60 °С – 70
Сумарні витрати енергії на сушіння, Вт/кг	120 – 190
Габаритні розміри, мм	2100×590×590
Маса установки, кг	140

Аналітичний розв'язок рівнянь (1) – (8), які описують робочий процес, ускладнений з огляду на їх нелінійність. Найбільш доцільним є розв'язок чисельними методами за допомогою ЕОМ. Розроблена програма розв'язку методом Рунге-Кутта-Мерсона з використанням стандартних підпрограм. Результати рішень рівнянь прямого ходу були вихідними для розв'язку рівнянь зворотного ходу. Отримані результати можуть бути використані при розрахунках подібних систем.

З метою перевірки якості функціонування досліджуваної вертикальної віброосушарки були проведені лабораторні випробування. Результати випробувань наведені у таблиці.

Отриманні результати (табл. 2) дозволили оптимізувати процес сушіння у розробленій вібраційній сушарці, а також довести питомі витрати енергії до значень 120 – 190 Вт/кг (в діапазоні вологості сипкого матеріалу від 25% до 13,5%).

Висновки

Розроблено та досліджено математичну модель вертикального вібраційного сушильного установи із гідроприводом привідного плунжерного гідроциліндра-вібратора, керування яким здійснюється за допомогою гідравлічного генератора імпульсів. Моделювання робочого процесу надає можливість визначати конструктивні розміри та параметри досліджуваного приводу зворотно-поступальної дії, правильний вибір яких сприятиме покращенню динамічних характеристик та режимів вібротранспортування сипких матеріалів відносно транспортуючих поверхонь сушильного установи. Завдяки застосуванню регульованого гідроприводу вдається досягти плавного регулювання частоти і амплітуди коливань транспортуючого органу, що сприяє підвищенню якості та збільшенню продуктивності вихідної продукції, а також зменшенню енерговитрат. Окрім того, результати моделювання можуть бути практично реалізовані в проектних розробках при визначенні оптимальних параметрів роботи запропонованої конструкції.

Експериментальна перевірка вертикальної вібраційної сушильної установи свідчить про його ефективність і достатньо високу якість процесу сушіння сипких матеріалів. Це дозволяє рекомендувати такі установки для широкого застосування в різних технологічних процесах, в яких виникає потреба вібраційного переміщення сипких матеріалів з одночасним нагрівом чи охолодженням.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гинзбург А.С., Резчиков В.А. Сушка пищевых продуктов в кипящем слое. – М.: Пищевая промышленность, 1966. –196 с.
2. Членов В.А., Михайлов Н.В. Виброкипящий слой. –М.:Наука, 1972. –289 с.
3. Гончаревич И.Ф., Фролов К.В. Теория вибрационной техники и технологии. –М.: Наука, 1981. –320 с.
4. Патент України 21544, МПК6 F 26 B 17/10, B 01 D 11/02. Вертикальна вібраційна сушарка / І. В. Коц, А. Б. Насіковський, В.В. Петрусь (Україна). – u200610897; заявл. 16.10.2006 ; опубл. заявл. 15.03.2007 ; опубл. № 3.
5. Патент України на корисну модель № 26734, МКл. F 26 B17/10. Установка для вібраційного сушіння / А. Б. Насіковський, І. В. Коц, В. В. Петрусь, М. Ф. Друкований; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – №u200703562; заявл. 02.04.2007; опубл.10.10.2007, Бюл. №16 від 10.10.2007.
6. Коц И. В. Перспективы использования гидроимпульсного привода рабочих органов горных машин ударного и ударно-вибрационного действия / Вибрация в технике та технологиях. – 2007. – №2(47). – С. 116-119.

Коц Іван Васильович - к.т.н., професор, завідувач кафедри інженерних систем у будівництві, Вінницький національний технічний університет, м.Вінниця, e-mail: ivkots@gmail.com

Ivan V. Kots – Ph.D., professor, Head of the Department of Engineering Systems in Construction, Head and Research Manager of the Research Laboratory of Hydrodynamics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: ivkots@gmail.com