

УДК 681.526

І. І. Ніколайчук, м. н. с.; Г. С. Ратушняк, к. т. н.; І. В. Коц, к. т. н., доц.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ РОБОЧИМ ПРОЦЕСОМ СУШИЛЬНОЇ КАМЕРИ

Отримано математичну модель процесу сушки гранульованих органічних матеріалів, що визначає кінцеву вологість продукту, як функції від величини падіння температури сушильного агента, що проходить через висушувану продукцію, і тривалість процесу сушіння (продуктивності сушильної установки). Система управління процесом сушіння, побудована на базі запропонованої моделі успішно працює на декількох підприємствах. Зроблено припущення, що подібні моделі будуть адекватно працювати в процесі сушіння аналогічних матеріалів в багатьох інших галузях промисловості.

Вступ та актуальність проблеми

Головною проблемою технологічного процесу сушіння гранульованих органічних матеріалів в сушарках неперервної дії, в яких як сушильний агент використовується нагріте повітря, є нерівномірність розподілу теплоносія в робочому просторі сушильної камери, що приводить до нерівномірності висушування матеріалу, який знаходиться в різних місцях внутрішнього простору сушарки. Це є причиною розкиду величин поточного і залишкового вологовмісту — пріоритетного показника якості вихідної продукції.

Порівняльний аналіз відомих технічних засобів та постановка задач дослідження

Перспективними способами сушіння сипучих матеріалів є способи сушіння у віброкиплячому шарі, які можуть бути реалізовані на різного типу вібраційних сушарках. Однак, зважаючи на відносно велику тривалість сушіння деяких матеріалів, найбільш переважними серед конструктивних рішень осушувачів такого типу є сушильні установки, що створені на основі вертикальних вібраційних конвеєрів, які порівняно з іншими видами сушарок значно збільшують тривалість перебування сипучого матеріалу в одному агрегаті [1–3]. Вертикальний вібротранспортер об'єднує процес переміщення вологого матеріалу, в умовах визначеної організації тепломасообмінних процесів, з його сушінням. Ефективність роботи таких установок залежить від правильного вибору їх параметрів, зокрема, реалізації оптимального управління робочим тепломасообмінним процесом всередині сушильної камери.

Об'єкт досліджень

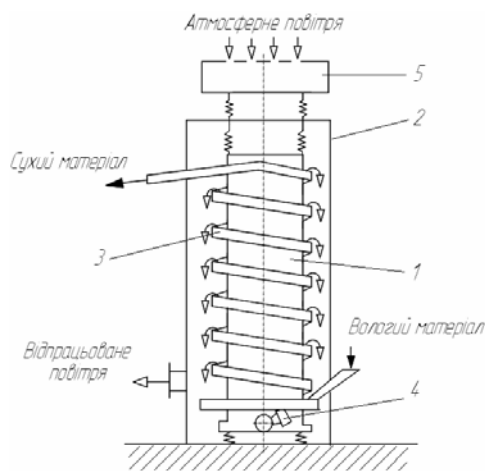


Рис. 1. Вертикальна вібраційна сушарка. У центрі циліндричної основи-корпусу 1 нагнітається гаряче повітря, за допомогою якого здійснюється сушіння, що підігрівається в калорифері 5.

Всередині циліндричної основи-корпусу 1 облаштовано систему отворів, які пов'язані із порожнинами під спіралеподібною перфорованою стрічкою 3. Повітря, яке проходить через перфорацію стрічки, контактує із транспортованим сипучим матеріалом. Сушіння відбувається як конвективним, так і кондуктивним шляхом. В той момент, коли частинки сипучого матеріалу знаходяться в польоті між окремими циклами вібротранспортування, так і безпосередньо, завдяки контакту із нагрітою поверхнею спіралеподібною перфорованою стрічкою 3, через яку проходить гаряче повітря. Повітря, що пройшло крізь висушуваний матеріал збирається всередині зовнішнього теплоізовольованого захисного кожуха 2, а потім видаляється за його межі. З метою досягнення необхідної якості сушіння сипучого матеріалу при відносно низьких питомих витратах енергії, необхідно провести оцінку та дослідження закономірностей реалізації оптимального управління робочим процесом запропонованої конструкції сушарки.

Дослідження робочих процесів вертикальної вібраційної сушарки

Математична модель сушильної установки вібраційного типу представляє собою систему з чотирьох диференціальних рівнянь в частинних похідних, складених відносно таких змінних процесу сушіння [1— 3, 5]:

$W_M = f_1(t, L)$ — вологість матеріалу (кг води/кг сухого матеріалу), де t — час, с; L — довжина вібротранспортування сипучого матеріалу, м.

$W_{II} = f_2(t, L)$ — вологість сушильного агента — гарячого повітря, (кг води/кг сухого повітря).

$T_M = f_3(t, L)$ — температура матеріалу, К.

$T_{II} = f_4(t, L)$ — температура сушильного агента — гарячого повітря, К.

Для того, щоб отримати розв'язання цієї системи процес сушіння в установці розглядався на основі експериментальних даних як процес, що складається з двох режимів — стаціонарного і нестаціонарного. Ділянка, на якій фактично швидкість сушіння не залежить від часу (стаціонарний режим), описується в математичній моделі рівняннями з однією змінною (довжиною переміщення матеріалу всередині сушильної камери — довжиною спіралеподібною перфорованою стрічкою 3), що дозволяє достатньо легко знайти їхнє розв'язання. При нестаціонарному режимі, тобто при залежності швидкості сушіння від часу, рівняння розв'язуються відносно змінної часу [1, 3, 5].

Питання щодо оптимізації управління розглядається в даному випадку, перш за все, з точки зору зниження енерговитрат. Для того, щоб мати на виході певне значення вмісту вологи в матеріалі достатньо варіювати температуру і потік (витрата) сушильного агента — гарячого повітря. Тобто, максимально знижуючи, наприклад, температуру сушильного агента, повинні мати на виході задовільно висушений матеріал. Зменшувати температуру і витрату сушильного агента — гаряче повітря, — зменшуючи тим самим енергетичні витрати, можливо лише до певної межі, критерієм в даному випадку є вологість матеріалу на виході із сушильної камери.

Як цільові функції, за аналогією з відомими рекомендаціями [1, 3], нами вибрані три такі:

1. Енергетичні витрати на сушіння матеріалу (передача теплової енергії із гарячого повітря в матеріал):

$$E_1 = (T_{II, \text{вх}} - T_{II, \text{вих}}) C_{II} V_{II} \rho_{II} S_{\text{еф}} / Q_{II},$$

де C_{II} — питома теплоємність повітря, Дж/кг; $T_{II, \text{вх}}$ — початкова температура гарячого повітря, К⁰; $T_{II, \text{вих}}$ — кінцева температура відпрацьованого повітря, К; ρ_{II} — густина повітря, кг/м³; $S_{\text{еф}}$ — ефективна площа поперечного перерізу, яким надходить гаряче повітря, м²; V_{II} — середня швидкість гарячого повітря, м/с; Q_{II} — витрата гарячого повітря, кг/с.

2. Енергетичні витрати на нагрівання повітря в калорифері 5 (рис. 1)

$$E_2 = (T_{\text{П.ВХ}} - T_{\text{НАВК.}}) C_{\text{П}} V_{\text{П}} \rho_{\text{П}} S_{\text{еф}} / Q_{\text{П}},$$

де $T_{\text{НАВК.}}$ – температура навколишнього середовища (прийнято 293 К).

3. Енергетичні витрати на нагрівання матеріалу і зменшення вологості матеріалу (передача теплової енергії в товщу матеріалу), згідно рекомендацій [2, 5]:

$$E_3 = \frac{\rho_{\text{М}} S_{\text{еф}} \frac{1}{10} V_{\text{М}} C_{\text{М}} (T_{\text{М.ВИХ}} - T_{\text{М.ВХ}})}{G_{\text{м}}} + \frac{W_{\text{М.ВХ}} - W_{\text{М.ВИХ}}}{W_{\text{М.ВХ}} + 1} \lambda,$$

де $\rho_{\text{М}}$ – густина матеріалу, кг/м³; $V_{\text{М}}$ – лінійна швидкість вібротранспортування матеріалу, м/с; $T_{\text{М.ВИХ}}, T_{\text{М.ВХ}}$ – кінцева і початкова температури матеріалу, К; $G_{\text{М}}$ – максимально допустима масова подача матеріалу, кг/с; $W_{\text{М.ВИХ}}, W_{\text{М.ВХ}}$ – вихідна і вхідна вологості матеріалу, кг води/кг сухого матеріалу; λ – питома теплота пароутворення, Дж/кг.

Ефективність режимів сушіння можливо визначити із співвідношення, яке в ідеалі повинно наближатись до одиниці

$$\frac{E_1}{E_2} \rightarrow 1.$$

При цьому також очевидно, що виконується така нерівність:

$$E_2 \geq E_1 \geq E_3.$$

Дослідимо, як приклад, поведінку цільової функції E_1 .

Розглянемо двоступінчастий процес управління. Перший рівень регулюється швидкістю вібротранспортування, яка встановлюється залежно від початкового значення вологості матеріалу і необхідного (заданого) кінцевого вмісту вологи. Другий рівень управління регулює витрату сушильного агента – гарячого повітря і його початкову температуру. Другий рівень забезпечує більш плавне регулювання вихідної вологості [1].

Таким чином, як параметри керування (параметри оптимізації) вибираються 3 параметри: $V_{\text{М}}$ – лінійна швидкість переміщення матеріалу відносно поверхні спіралеподібної перфорованої стрічки 3 (рис. 1); $V_{\text{П}}$ – швидкість руху сушильного агента – гарячого повітря – пропорційна його витраті; $T_{\text{П.ВХ}}$ – початкова температура гарячого повітря після калорифера 5.

Зафіксуємо перший рівень регулювання, тобто задамо постійну лінійну швидкість вібротранспортування сипучого матеріалу, що задовольняє задану і початкову вологості матеріалу. Тоді управління здійснюватиметься за допомогою другого рівня. Результати моделювання за такими ознаками і згідно з реальними конструктивними і робочими параметрами експериментальних вібраційних сушарок показані на графіку цільової функції (рис. 2).

Як видно з рис. 2, мінімум цільової функції виходить за обмеження областей згідно зі змінними $T_{\text{П.ВХ}}$ і $V_{\text{П}}$. Таким чином, оптимальні параметри сушіння будуть вибиратися, виходячи з функціонального обмеження за якістю сушіння

$$W_{\text{М.ВИХ}} \leq W_{\text{М.ВИМ}},$$

де $W_{\text{М.ВИМ}}$ – заданий рівень вмісту вологи в матеріалі, необхідний згідно з нормативами на конкретну продукцію.

Поведінка цільових функцій E_2 і E_3 аналогічна поведінці цільової функції E_1 , тобто вони не мають на даному діапазоні зміни параметрів керування тепломасообмінним про-

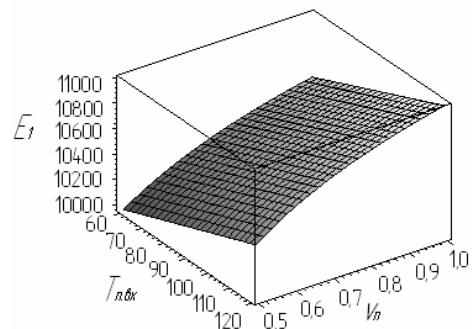


Рис. 2. Графік цільової функції E_1

цесом сушіння матеріалу локальних екстремумів.

Таким чином, оптимальні параметри будуть знаходитися за результатами розв'язання крайової задачі для знаходження значення $W_{M,вих}(t)$, яке задовольняє задані обмеження.

Висновки

1. Запропоновано методику і алгоритм здійснення оптимального управління теплома-сообмінним процесом сушильної камери вібраційної сушарки, яка створена на основі вертикального вібраційного конвеєра.

2. На підставі проведених досліджень теплома-сообмінного процесу у сушильній камері встановлено основні напрямки витрат теплової енергії, аналіз яких дав можливість оптимізувати параметри сушіння і забезпечити належну якість вихідної продукції.

3. Вибрано ефективні режими сушіння, розроблено рекомендації щодо рівнів регулювання даної складної системи, визначено шляхи для подальшого вдосконалення ефективності роботи сушильних агрегатів вібраційного типу на прикладі вертикальної вібраційної сушарки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Червоненко А. Г., Миронюк А. Ф., Гусаревич А. И. Методика расчета вертикальных вибрационных сушильных установок с конвективным методом сушки // Проблемы вибрационной техники: Сб. науч. тр. ИГТМ АН УССР. — К.: Наукова думка, 1970. — С. 98—108.
2. Окунева Г. Л., Прасол Д. А. Моделирование процесса распределения теплоносителя в камерной сушилке // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB: Сб. тр. Второй Всероссийской научной конференции. — М.: ИПУ РАН, 2004. — С. 682—687.
3. S. Goncharova V. Chelnokov, V. Menshikov, N. Menshutina. Mathematical modeling of cross-flow belt dryer for polymer drying. Drying'98 – Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS'98), Halkidiki, Greece, August 19—22, 1998, Vol. A. — P. 407—413.
4. Коц І. В., Дец О. Ю. Математичне моделювання робочого процесу віброосушарки з гідроприводом // Машиностроение и техносфера XXI века. Сб. тр. XI межд. н.-т. конф. (Севастополь: 13—18 сентября, 2004 г.) — Донецк: ДонНТУ, 2004. — С. 64—68.
5. Янюк Ю. В. Питухин Е. А. Об оптимизации управления сушильной установкой барабанного типа // Новые информационные технологии в целлюлозно-бумажной промышленности и энергетике. Материалы 5-й межд. н.-т. конф. — Петрозаводск: ПетрГУ, 2002. — С. 113—115.
6. Степанченко И. В. Исследование дискретных систем управления при влиянии ограниченности параметров технических средств // Наука Кубани. Библиотека журнала: Сб. науч. тр. — Краснодар, 2001. — С. 201—212.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом VIII Міжнародної конференції «Контроль і управління в складних системах» (КУСС-2005, 24—27.10.2005 р)

Надійшла до редакції 10.11.05
Рекомендована до друку 22.11.05

Ніколайчук Ірина Іванівна — молодший науковий співробітник НДЛ гідродинаміки;
Ратушняк Георгій Сергійович — завідувач кафедри, **Коц Іван Васильович** — доцент.

Кафедра теплогазопостачання, Вінницький національний технічний університет