

МЕТОДИКА РЕКУРЕНТНОГО РОЗРАХУНКУ ГРАВІТАЦІЙНОЇ ПОЛИЧНОЇ СУШАРКИ

Шандиба Н.О., аспірантка, Юхименко М.П., к.т.н., доцент
Сумський державний університет, м. Суми

Запропоновано методику рекурентного розрахунку гравітаційної полицної сушарки для термолабільних сипких матеріалів. Оптимізація температурного режиму сушіння з використанням чисельних рішень дозволила скоротити енерговитрати та підвищити якість продукції.

The recurrent calculating method of the shelf dryers for termolabile-grained materials drying was proposed. The optimization of temperature regime drying with the numerical solutions using allows to reduce energy costs and to improve product quality.

Ключові слова: сушіння, полицна сушарка, термолабільний матеріал, розрахунок.

Вступ. Розвиток техніки сушіння ставить нові підвищені вимоги до технологічних, екологічних та економічних характеристик апаратурного обладнання сучасних виробництв, спеціалізованих в галузі переробки сільськогосподарської продукції [1,2]. Особлива увага приділяється питанням енергозбереження та оптимізації вологості згідно термінів зберігання і переробки зерна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій В результаті аналізу методів сушіння виявлені найбільш перспективні комбіновані методи, які передбачають цикли (або ступені) диференційованого нагріву та випаровування вологи. Більшість промислових сушарок, що використовують нагріте повітря в якості сушильного агента, відносяться до сушарок конвективного типу, в яких повітря постачає тепло в шар дисперсного матеріалу і забирає з нього вологу. При цьому циклічний характер проведення процесу зменшує температурні градієнти, перепади вологості та можливе пересушування. Таким чином, поєднання переваг інтенсивного тепломасообміну в зваженому шарі дисперсного матеріалу при протитічному ступеневому режимі взаємодії з сушильним агентом робить гравітаційні полицні сушарки економічними та конкурентоздатними в умовах малої та середньої продуктивності.

В той же час слід звернути увагу на недосконалість існуючих методів розрахунку, що ускладнює вибір та оптимізацію конструкції сушарки при зміні характеристик дисперсного продукту та теплового режиму його обробки [2-4]. Адаптація загального підходу до розрахунків виявила необхідність отримання специфічних експериментальних даних, що проблематично у виробничих умовах.

Постановка завдання. В даній роботі розглядається принципова можливість використання рекурентного методу визначення інтегральних технологічних параметрів для багатоступеневого процесу сушіння термолабільних зернових матеріалів.

Математична модель процесу. Розглянемо взаємодію потоку сушильного агента (повітря) зі структурою зернового матеріалу в процесі сушіння (рис.1).

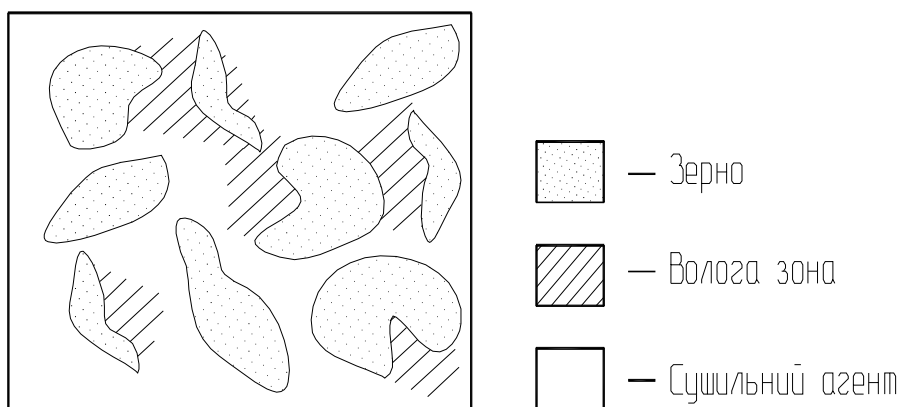


Рис. 1 – Структура взаємодії потоків сушильного агента та матеріалу

Згідно теорії А.В. Ликова, в дисперсній структурі взаємодіючих потоків при сушінні можна виділити зерновий матеріал з локалізованими в ньому зоною випаровування та вологою зоною, відносний об'єм яких змінюються з часом [3]. При цьому тверда та газова фази характеризуються деяким комплексом показників вмісту вологи та температури. Однією з рушійних сил процесу приймаємо різницю температур вологої зони та основного об'єму сушильного агента. Іншою складовою буде перенос водяної пари з вологих зон в потік сушильного агента за рахунок різниці вологовмісту.

Виходячи з цього, зміна теплового потоку під час охолодження сушильного агента (повітря) в контакті з зерном запишеться у вигляді:

$$dQ = d(c_e \cdot \rho_n \cdot e \cdot b \cdot t) = -ks(t - t')d\phi, \quad (1)$$

де c_e – теплоємність води; ρ – густина повітря; ε – відносний об'єм, який займає повітря; b – вологість повітря; k – коефіцієнт тепловіддачі; τ – час; s – питома поверхня контакту взаємодіючих потоків.

Тепловий потік в шарі зерна буде відрізнятись лише знаком, у зв'язку з нагріванням матеріалу за рахунок сушильного агента:

$$dQ' = d(c_e \cdot \rho_m \cdot e_l \cdot x \cdot t') = ks(t - t')d\phi, \quad (2)$$

де ρ – густина матеріалу; ε_l – об'єм, який займає волога зона матеріалу; x – вологість матеріалу.

Слід зауважити, що відносні об'єми зазначених зон в сумі дорівнюють $e_0 + e_l + e = 1$, або $e_l + e = m$, де e_0 – відносний об'єм, що займає зерновий матеріал, ε_l – відносний об'єм вологої зони.

Під знаком диференціалу в обох рівняннях фігурують дві змінні – температура та вологість, але залежність вологості від температури дозволяє спростити вирази (1), (2). В моделі прийнято усереднені значення вмісту вологи в зонах, що безпосередньо прилягають до поверхні матеріалу і у вільному об'ємі повітря.

Аналіз експериментальних даних температур та вологості повітря і матеріалу в процесі сушіння підтверджує існування кореляції між ними (рис.2). При цьому вологість у вологій зоні матеріалу зменшується з підвищенням температури і може бути апроксимована функцією:

$$x = x_0 + \frac{\lambda'}{t'}, \quad (3)$$

де t' – температура матеріалу; x_0 , λ' – параметри апроксимуючої кривої.

Аналогічно, вологість сушильного агента b збільшується зі зменшенням його температури в процесі сушіння і також апроксимується аналогічним виразом:

$$b = b_0 + \frac{\lambda}{t}, \quad (4)$$

де t – температура сушильного агента; b_0 , λ – параметри апроксимуючої кривої.

Необхідно відмітити, що параметри апроксимуючої гіперболи визначаються за методом найменших квадратів [5,6], їх деталізація проведена для обґрунтування методики розрахунку інтегральних параметрів процесу на кожному ступені сушарки (рис.3).

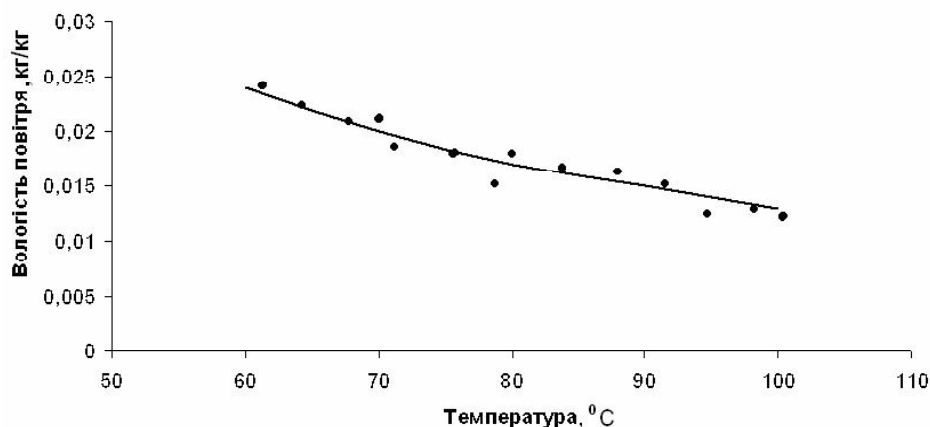


Рис. 2 – Апроксимація зміни вологості повітря в залежності від температури

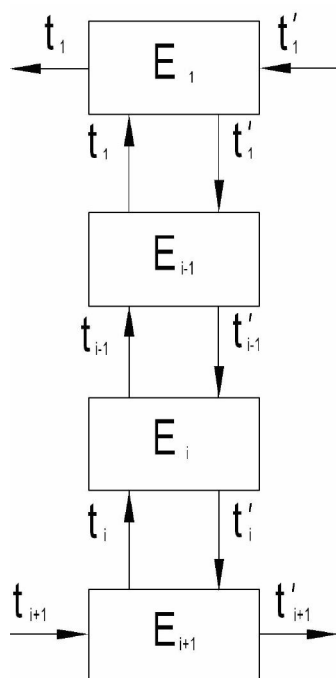


Рис. 3 – Розрахункова схема полицної сушарки

Використовуючи апроксимації (3), (4) для вологості маємо систему:

$$\begin{cases} dt = \frac{-ks(t-t')}{\varepsilon \cdot c_g \cdot \rho_n \cdot b_0} d\tau \\ dt' = \frac{ks(t-t')}{\varepsilon_1 \cdot c_g \cdot \rho_m \cdot x_0} d\tau \end{cases} \quad (5)$$

Віднімаючи від першого рівняння друге отримаємо просте диференціальне рівняння:

$$d(t-t') = -\frac{ks}{c_g} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon \cdot \rho_n \cdot b_0} + \frac{1}{\varepsilon_1 \cdot \rho_m \cdot x_0} \right) (t-t') d\phi \quad (6)$$

Інтегрування дає кінетику процесу стосовно температур для і-го ступеню сушіння

$$\frac{t_{i-1} - t'_i}{t_i - t'_{i-1}} = \exp(-A\phi), \quad (7)$$

де А – кінетичний температурний параметр процесу

Аналогічні міркування дають підстави для запису кінетики переносу водяної пари у вигляді:

$$\frac{x_i - b_{i-1}}{x_{i-1} - b_i} = \exp(-B\phi) \quad (8)$$

де В – кінетичний параметр вологості.

Таким чином, маємо два кінетичних рівняння з чотирма невідомими (t_{i-1} ; t'_{i-1} ; x_{i-1} ; b_{i-1}).

Додамо ще одне рівняння теплового балансу потоків зернистого матеріалу та сушильного агенту:

$$g c_m (t'_i - t'_{i-1}) + g c_g (x_i t'_i - x_{i-1} t'_{i-1}) = G c_n (t_i - t_{i-1}) + G c_g (b_i t_i - b_{i-1} t_{i-1}), \quad (9)$$

де t'_i , x_i – відповідно температура та вологість матеріалу в і-му ступені сушарки; t_i , b_i – відповідно температура та вологість повітря в і-му ступені сушарки; c_m – теплоємність матеріалу; c_g – теплоємність води; c_n – теплоємність повітря; g – витрата сухого матеріалу; G – витрата повітря.

Замикання системи досягається останнім (четверте) рівнянням матеріального балансу вологості потоків матеріалу та сушильного агента, що взаємодіють в протічній режимі :

$$g(x_{i-1} - x_i) = G(b_{i-1} - b_i) \quad (10)$$

В результаті отримали всі рівняння для визначення невідомих (t_{i-1} ; t'_{i-1} ; x_{i-1} ; b_{i-1}).

Результати розрахунку полицної сушарки. В запропонованому апараті для реалізації інтенсивних способів сушіння передбачається секціонування внутрішнього простору шляхом встановлення каскаду перфорованих полиць під деяким кутом, створюючи умови гравітаційного руху матеріалу вздовж полиць та його пересипання з однієї полиці на іншу. На кожній з полиць в такій конструкції створюється ефективне перемішування, властиве зваженому шару, при збереженні переваг організованого протитечійного режиму.

В прийнятій розрахунковій моделі простір між полицями розглядається як окремий тепломасообмінний ступінь, а взаємодіючі потоки умовно розбиваються на ряд послідовно з'єднаних зон сушіння, в кожній із яких відбувається ідеальне перемішування.

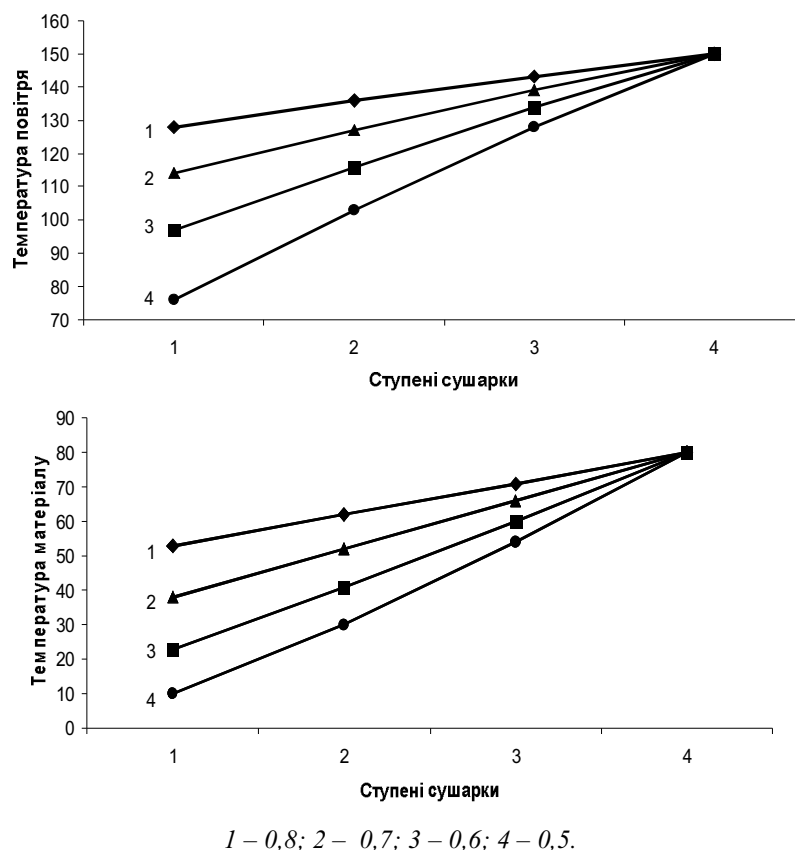
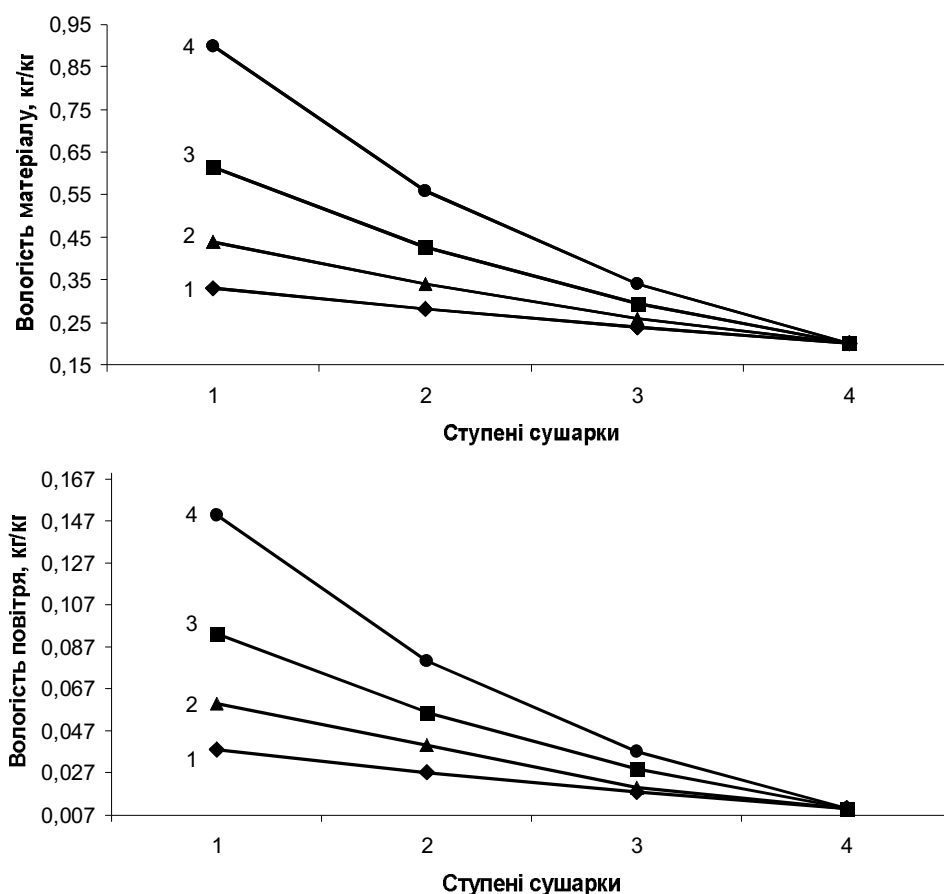


Рис. 4 – Зміни температури взаємодіючих потоків по ступеням сушарки

Рекурентна процедура передбачає попарне визначення температур і вологості матеріалу та сушильного агента (повітря) для кожного ступеню (секції) апарату, що утворюється між суміжними полицями. Розрахунок розпочинається з останнього ступеня, задаючись його кінетичними характеристиками (7,8), початковою температурою та вологістю нагрітого повітря, необхідними параметрами нагрітого зерна після сушіння. Алгоритм досить просто реалізується в прикладній програмі, результати представлені на рисунках 4,5.



1 – 0,8; 2 – 0,7; 3 – 0,6; 4 – 0,5.

Рис. 5 – Зміни вологості взаємодіючих потоків по ступеням сушарки

Висновки

Вирішення системи рівнянь кінетики тепломасообміну та матеріального балансу для гравітаційної полицної сушарки дозволило розробити методику рекурентного розрахунку аналогічних багатоступеневих конструкцій. Чисельне моделювання процесу згідно методики може бути рекомендоване для оптимізації температурного режиму сушіння як на стадії проектування, так і в процедурі енергоаудиту діючого виробництва для скорочення енерговитрат та підвищення якості продукції.

Література

1. Малин Н.И. Энергосберегающая сушка зерна. – М.: Колос – 2004. – 240 с.
2. Юхименко М.П., Вакал С.В., Кононенко М.П., Філонов А.П. Апарати завислого шару. Теоретичні основи і розрахунок. – Суми: Собор. – 2003. – 304 с.
3. Муштаев В.И., Ульянов В.М., Тимонин А.С. Сушка в условиях пневмотранспорта. – М.: Химия. – 1984. – 232 с.
4. Сажин Б.С. Обобщённая методика расчёта процессов конвективной и кондуктивной сушки/ Б.С. Сажин, В.А.Реутский // Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств: тезисы докладов Всесоюзной научной конференции. – Харьков. – 1985. – С. 100-101.
5. Иванов В.Е. Сушка дисперсных материалов в сушилке кипящего слоя: Автореферат дис. канд. техн. наук. – Иваново. – 2010. – 16 с.
6. Гортышов Ю.Ф., Дресвянников Ф.Н., Идиатуллин и др. Теория и техника теплофизического эксперимента. – М.: Энергоатомиздат. – 1985. – 360 с.