

УДК 664.72.001.2

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВОЛОГІСТНОЇ АПРОКСИМАЦІЇ В РОЗРАХУНКАХ БАГАТОСТУПЕНЕВИХ СУШАРОК

Артюхова Н.О., аспірант*
Сумський державний університет
Тел.(0542) 33-70-73

Анотація – представлена робота присвячена теоретичному опису та експериментальному дослідженню кінетики сушіння зернистих матеріалів у багатоступеневих апаратах поличного типу.

Ключові слова – кінетика сушіння, температурно-вологісна апроксимація, багатоступеневе сушіння, гравітаційна полична сушарка.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку промисловості актуальним питанням, яке потребує вирішення, є пошук способів сушіння з мінімальною енергоємністю [1]. Перспективним напрямом зменшення енергетичних витрат при проведенні тепломасообмінних процесів у завислому шарі є використання багатоступеневого протитечійного контакту зріджуючого агента та дисперсної фази. Такі процеси (знепилювання, пневмокласифікація, гранулювання, теплообмін та ін.) реалізуються в апаратах поличного типу. Використання представленої організації руху потоків у застосуванні до сушіння не знайшло широкого огляду в сучасній науковій літературі, тому потрібен більш глибокий аналіз гідродинамічних умов та кінетики проведення цього процесу, розробка надійних методів розрахунку поличних сушарок та вдосконалення їх конструкцій [2].

Створення математичної моделі, де буде враховано зміну параметрів сушильного агента та зернистого матеріалу, з якого видаляється волога, визначення їх впливу на час перебігу процесу та його енергетичну ефективність є одним з етапів реалізації високоінтенсивного процесу сушіння у багатоступеневих апаратах поличного типу.

Аналіз останніх досліджень. Наукові основи роботи апаратів поличного типу в процесах знепилювання, пневмокласифікації, сепарації вивчені достатньо змістовно та висвітлені в роботах [3,4].

© Артюхова Н.О., аспірант

* Науковий керівник – к.т.н., доцент Юхименко М.П.

Принципову можливість використання гравітаційних поличних апаратів для проведення процесів сушіння обґрунтовано в роботі [7], де наведено результати сушіння хлориду калію, піросульфату натрію та металевих порошків. При цьому відзначено лише якісне зменшення вологості матеріалу, який піддається сушінню, до граничних значень вологості кінцевого продукту (0,1-1,2%) і напруженості за вологою (400-1900 (кг/м³·год)). Ці характеристики змінюються у достатньо широкому діапазоні і, як видно з результатів попередніх експериментальних випробувань, неможливо визначити оптимальні значення як режимних, так і конструктивних параметрів сушарки.

Постановка завдання. Завданням представленої роботи є дослідження кінетики процесу сушіння зернистих матеріалів у багатоступеневій протитечійній поличній сушарці та оцінка ефективності кожного з її ступенів на базі створеної математичної моделі та результатів експериментальних досліджень.

Основна частина. У процесі сушіння зернопродуктів звичайно виділяють початковий прогрів зерна з незначною ефективністю видалення вологи а потім періоди постійної та спадаючої швидкості процесу. Вплив того чи іншого парціального механізму масопереносу на кожній з вказаних стадій буде різним, але градієнтний характер транспорту вологи від центральних шарів зерна та його пористої структури в потік сушильного агента є ґрунтовною базою відомих математичних моделей процесу [5-8].

Аналіз дисперсної структури взаємодіючих потоків при сушінні показав, що можна виділити об'єм зернового матеріалу з вологими зонами, локалізованими на його поверхні та у порах; відносна частка їх може змінюватися з часом, але в сумі всі відносні складові завжди будуть дорівнювати одиниці $\varepsilon_0 + \varepsilon_1 + \varepsilon = 1$, де ε_0 - відносний об'єм; що займає зерновий матеріал, ε_1 та ε - відносні об'єми вологих зон та сушильного агента, $\varepsilon_1 + \varepsilon = m$, де m – пористість Т-Г середовища.

Однією з рушійних сил процесу приймаємо різницю температур і, відповідно, парціальних тисків пари, що знаходиться у вологій зоні зернового матеріалу та пари, що утримується в основному потоці сушильного агента. Цей механізм доповнюється переносом водяної пари з вологих зон у потік сушильного агента за рахунок різниці вологовмісту. У такому разі, враховуючи відому аналогію тепло- та масообмінних процесів і використовуючи гіпотезу Люїса щодо співвідношення коефіцієнтів тепло- та масовіддачі [6], запишемо кількість тепла, перенесеного вологими парами за час контакту сушильного агента (повітря) із зерновим матеріалом у вигляді

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

де c_e – теплоємність води;

ρ_n – густина повітря;

ε – відносний об'єм, який займає повітря;

b – вологість повітря;

k – коефіцієнт тепловіддачі;

τ – час;

s – питома поверхня контакту взаємодіючих потоків.

З іншого боку, тепло, що втрачається вологими зонами зерна, буде пропорційним різниці температур пари в потоці сушильного агенту та у вологій зоні і відрізнятиметься знаком

$$dQ' = d(c_m \cdot \rho_m \cdot \varepsilon_l \cdot x \cdot t') = ks(t - t')d\tau, \quad (2)$$

де ρ_m – густина матеріалу;

ε_l – об'єм, який займає волога зона матеріалу;

x – вологість матеріалу.

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

Узагальнення експериментальних даних ряду досліджень підтверджує існування кореляції між температурою та вологістю повітря і матеріалу в процесі сушіння. Зменшення вологості з підвищенням температури спостерігається на всьому діапазоні виробничих режимів сушіння і звичайно апроксимується монотонними ділянками функцій експоненційного, гіперболічного або ступеневого типу [7-10]. Статистична оцінка точності подібних апроксимацій при реальних виробничих обмеженнях параметрів процесу не надає особливих переваг тій, чи іншій залежності.

Таким чином, для отримання більш зручних аналітичних рішень, приймемо зменшення вологості у вологій зоні матеріалу при підвищенні температури у вигляді оберненопропорційної залежності:

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

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 [9], їх деталізація проведена при обґрунтуванні методики розрахунку інтегральних параметрів процесу на кожному ступені сушарки відповідно до рис. 1.

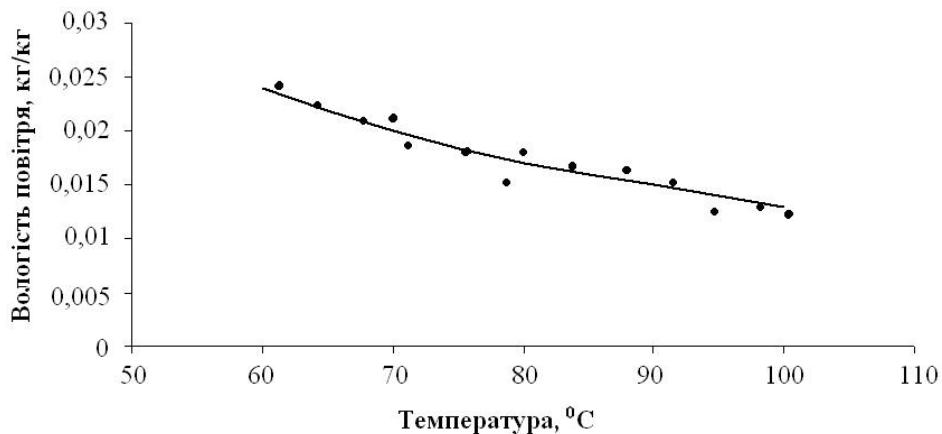


Рис. 1. Залежність вологості сушильного повітря від температури.

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

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

Віднімаючи від першого рівняння друге, отримаємо простий диференціал, що легко інтегрується

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

У результаті отримаємо кінетику процесу стосовно температур для i -го ступеню сушіння відповідно до рис. 2

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

де A – кінетичний температурний параметр процесу.

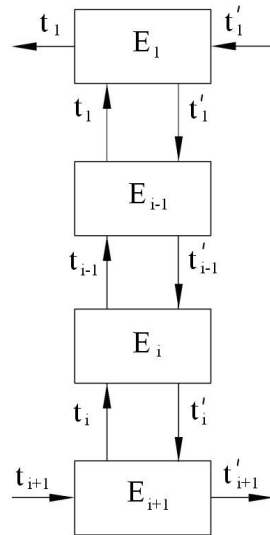


Рис. 2. Розрахункова схема гравітаційної багатоступеневої сушарки.

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

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

де B – кінетичний параметр транспорту вологи.

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 зернового матеріалу та сушильного агента

$$gc_m(t'_i - t'_{i-1}) + gc_s(x_i t'_i - x_{i-1} t'_{i-1}) = Gc_n(t_i - t_{i-1}) + Gc_s(b_i t_i - b_{i-1} t_{i-1}), \quad (9)$$

де t'_i , x_i – відповідно температура та вологість матеріалу в i -му ступені сушарки;

t_i , b_i – відповідно температура та вологість повітря в i -му ступені сушарки;

c_i – теплоємність матеріалу;

c_w – теплоємність води;

c_n – теплоємність повітря;

g – витрата сухого матеріалу;

G – витрата повітря.

Замикання системи досягається останнім (четвертим) рівнянням матеріального балансу вологості потоків матеріалу та сушильного агента, що взаємодіють у протитечійному режимі

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

У 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 у такій конструкції створюється ефективне перемішування, властиве зваженому шару, при збереженні переваг організованого протитечійного режиму. У 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. 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 у прикладній програмі [9].

Розглянемо показники вологості взаємодіючих потоків на останніх двох ступенях процесу сушіння з ефективністю $E_i = (x_{i+1} - x_i)/(b_{i+1} - x_i)$ та $E_{i-1} = (x_i - x_{i-1})/(b_i - x_{i-1})$ на фрагменті розрахункової схеми багатоступеневої протитечійної сушарки відповідно до рис. 3.

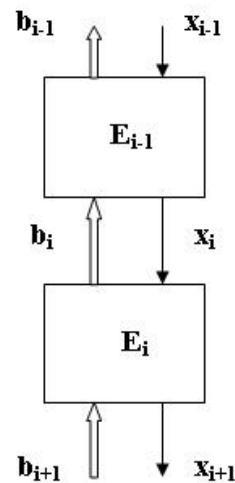


Рис. 3. Фрагмент розрахункової схеми багатоступеневого процесу сушіння.

Тоді система рівнянь, що зв'язують кінетику та матеріальний баланс вологості для i -го ступеня сушарки, матиме вигляд:

$$\begin{cases} x_i = \frac{x_{i+1} - E_i b_{i+1}}{1 - E_i} \\ b_i = b_{i+1} + \frac{q}{Q} E_i (x_i - b_{i+1}) \end{cases} \quad (11)$$

Припускаючи, для спрощення викладок, що сушильний агент (повітря) має нульову вологість, тобто $b_{i+1} = 0$, отримаємо таку систему:

$$\begin{cases} x_i = \frac{x_{i+1}}{1 - E_i} \\ b_i = \frac{q}{Q} E_i x_i \end{cases} \quad (12)$$

Для $(i-1)$ ступеню система (11) може бути записана аналогічно:

$$\begin{cases} x_{i-1} = \frac{x_i - E_{i-1} b_i}{1 - E_{i-1}} \\ b_{i-1} = b_i + \frac{q}{Q} E_{i-1} (x_{i-1} - b_i) \end{cases} \quad (13)$$

Враховуючи (12), вологість зернового матеріалу перед $(i-1)$ ступенем сушарки зростатиме таким чином

$$\begin{aligned}
 x_{i-1} &= \frac{\frac{x_{i+1}}{1-E_i} - E_{i-1}b_i}{1-E_{i-1}} = \frac{x_{i+1} - E_{i-1}b_i(1-E_i)}{(1-E_{i-1})(1-E_i)} = \\
 &= \frac{x_{i+1} - E_{i-1}(1-E_i)\frac{q}{Q}E_i x_i}{(1-E_{i-1})(1-E_i)} = \frac{x_{i+1} - E_i E_{i-1} \frac{q}{Q} x_{i+1}}{(1-E_{i-1})(1-E_i)} x_{i+1} \frac{1 - \frac{q}{Q} E_i E_{i-1}}{(1-E_{i-1})(1-E_i)}
 \end{aligned} \quad (14)$$

Неважко побачити, що найпростіша апроксимація ефективності двох суміжних ступенів сушарки у вигляді функції (1) при фіксованому співвідношенні витрат взаємодіючих потоків зерна та сушильного агента $Q_i^{-1} = \frac{q}{Q}$ дає максимальне перевищення вологості

x_{i-1} над кінцевою вологістю матеріалу x_{i+1} за умови рівної ефективності ступенів, тобто $E_{i-1} = E_i = \text{idem}$.

Можна показати, що послідовне проведення аналогічної процедури для інших суміжних ступенів каскаду свідчить, що енергозберігаючий режим з максимальним зниженням вологості зерна досягається за умови однакової ефективності ступенів.

Висновки. Максимальне зниження вологості зерна в протитечійному енергозберігаючому режимі сушіння досягається за умови однакової ефективності ступенів, а зниження коефіцієнта вологовіддачі необхідно компенсувати більш тривалим часом перебування (контакту) зерна на цих ступенях. Результати математичного моделювання та експериментальних досліджень дозволяють провести оптимізаційний розрахунок гравітаційної поличної сушарки з визначенням конструктивних і технологічних параметрів процесу, при яких ефективність кожного зі ступенів каскаду буде максимальною.

Література:

1. *Burdo O.* Posibilități de sporire a eficienței energetice a procesului de uscarea a produselor dispersate / O. Burdo, I. Kazmiruk // Problemele energeticii regionale. – București. – 2008. – №1(6).– pp. 56-62.

2. *Артюхова Н.О.* Математична модель кінетики сушіння зернистих матеріалів у гравітаційних поличних апаратах / Н.О. Артюхова, М.П. Юхименко // Збірник тез доповідей I Міжнародної науково-технічної конференції "Хімічна технологія: наука та виробництво". – Суми: СумДУ. – 2012. - С. 99.

3. *Курсанов В.А.* Научные основы и принципы совершенствования процессов и аппаратов каскадной

пневмокласификации сыпучих материалов: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.17.08 / Кирсанов В.А. // Новочеркасск, 2005. – 391 с.

4. *Barsky E. Cascade Separation of Powders* / E. Barsky, M. Barsky. – Cambridge Int Science Publishing. – 2006. – 460 p.

5. *Малин Н.И. Энергосберегающая сушка зерна* / Малин Н.И. – М.: Колос, 2004.–240 с.

6. *Гладков В.А. Вентиляторные градирни* / В.А. Гладков, Ю.И. Арефьев, В.С Пономаренко. – М.: Стройиздат, 1976. – 216 с.

7. Апарати завислого шару. Теоретичні основи і розрахунок / [Юхименко М.П., Вакал С.В., Кононенко М.П., Філонов А.П.]. – Суми: Собор, 2003. – 304 с.

8. *Муштаев В.И. Сушка в условиях пневмотранспорта* / В.И. Муштаев, В.М. Ульянов, А.С. Тимонин. – М.: Химия, 1984. – 232 с.

9. *Юхименко М.П. Методика рекуррентного розрахунку гравітаційної поличної сушарки* / М.П. Юхименко, Н.О. Шандиба // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса. – 2011. – Вип. 39. – С.136-140.

10. *Коновалов В.И. Современные теории переноса при сушке* / В.И. Коновалов, Т. Кудра, Н.Ц. Гатапова // Вестник ТГТУ. –Тамбов. – 2008. – Том 14. – № 3. – С. 538-559.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОЙ АППРОКСИМАЦИИ В РАСЧЁТАХ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ СУШИЛОК

Артюхова Н.А.

Аннотация – представленная работа посвящена теоретическому описанию и экспериментальному исследованию кинетики сушки зернистых материалов в многоступенчатых аппаратах полочного типа.

THE APPLICATION OF TEMPERATURE- MOISTURE APPROXIMATION IN MULTISTAGE DRYERS CALCULATIONS

N. Artyukhova

Summary

This work is devoted to the theoretical description and experimental study of drying kinetics for the granular materials in multistage shelving apparatus.