

Висновки. Таким чином, вивчення впливу сорбційного гістерезису на ДФР сушеної продукції показує, що криві ДФР, отримані із ізотерм сорбції-десорбції істотно відрізняються за характером залежності від радіусу мікрокапілярів, що не дозволяє оцінити внесок мікрокапілярів у такий інтегральний показник як коефіцієнт дифузії без точного його розрахунку за запропонованою вище методикою. Як показують проведені дослідження, вплив сорбційного гістерезису на процес відновлення (обводнення) залежить також від способу сушіння: для ЗТП-сушіння вплив сорбційного гістерезису носить складніший характер.

Список літератури

1. Гинзбург, А. С. Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов [Текст] / А. С. Гинзбург, М. А. Громов. – М. : Агропромиздат, 1987.–27 с.
2. ГОСТ 28561-90. Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сухих веществ или влаги [Текст]. – М. : Издательство Госстан-дартов, 1990. – 14 с.
3. Гинзбург, А. С. Массообменные характеристики пищевых продуктов [Текст] / А. С. Гинзбург, И. М. Савина. – М. : Легкая и пищевая пром-сть, 1982.–280 с.

Отримано 01.10.2010. Харків.

© М.П. Головка, В.О. Захаренко, Л.О. Чуйко, 2010.

УДК 664.834.2

М.І. Погожих, д-р техн. наук, проф.

М.М. Цуркан, канд. техн. наук, доц.

ПРОЦЕС СУШІННЯ ЯК ВІДПОВІДНА ЗМІНА ТЕРМОДИНАМІЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ МОДЕЛЬНОЇ СИСТЕМИ

Наведено алгоритм визначення термодинамічного потенціалу модельної системи яку являють собою харчова сировина, яка зневоднюється, та сушильний агент і математичний аналіз його зміни у процесі сушіння.

Приведен алгоритм определения термодинамического потенциала модельной системы, которую представляют собой пищевое сырье, что обезвоживается, с сушильным агентом и математический анализ его изменения в процессе сушки.

The algorithm of determination of thermodynamics potential of the model system which are food raw material, that is dehydrated, with a drying agent and mathematical analysis of his change in the process of drying is resulted in the article.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Процеси сушіння різноманітної харчової сировини є одними з найбільш енергозатратних технологічних процесів харчової промисловості незалежно від способу їх реалізації, тому пошук шляхів підвищення енергоефективності процесів сушіння поряд з іншими технологічними процесами у харчовій промисловості є пріоритетною проблемою для галузевої науки.

Для успішного вирішення даної проблеми, насамперед, необхідні відповідні теоретичні дослідження процесів сушіння на прикладі визначених фізичних та математичних моделей, які дадуть змогу описувати реальні тепломасообмінні процеси на основі відповідних функціональних залежностей і, таким чином, керувати процесом з метою досягнення його максимальної енергоефективності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом одним з перспективних напрямів теоретичних досліджень є опис та моделювання процесів сушіння харчової сировини з точки зору відповідної поведінки визначеної термодинамічної системи. Це дає змогу системазувати велику низку результатів розрізаних експериментальних досліджень та зв'язати параметричні залежності які описують той чи інший процес.

У праці [1] у якості феноменологічної гіпотези процесу сушіння харчової сировини було прийнято еволюцію термодинамічної системи з початкового нерівноважного стану до кінцевого рівноважного стану який відповідає закінченню процесу, причому, для процесу сушіння у масообмінних модулях цей перехід здійснюється через стан з максимумом вільної енергії системи.

Згідно з теорією нерівноважної термодинаміки еволюція термодинамічної системи від одного стану рівноваги (стійкої або нестійкої) до іншого може проходити безліччю шляхів, оскільки визначається деякою низкою термодинамічних параметрів стану та параметрів процесу і є, відповідно, у кожній точці процесу рішенням системи диференційних рівнянь починаючи з першого ступеня. Отже, для вирішення завдання пошуку найбільш енергоефективного шляху термодинамічної системи до стану рівноваги необхідно, вочевидь, детермінувати ці шляхи через введення універсальних характеристичних функцій або, іншими словами, термодинамічних потенціалів системи, які б звужували кількість параметричних залежностей та максимально їх спрощували. А зміна такого термодинамічного потенціалу, яка визначається затратами енергії та механізмами її розсіювання і є «роботою усіх узагальнених сил»,

визначалась б початковими умовами реального процесу сушіння як відповідного термодинамічного процесу.

Таким чином, ця робота є продовженням досліджень процесів сушіння методом термодинамічних потенціалів [2].

Мета та завдання статті. Метою статті є математичний аналіз процесу сушіння із застосуванням конкретної фізичної моделі термодинамічної системи та розробка алгоритму визначення термодинамічного потенціалу системи, який дасть змогу в подальшому знаходити (прогнозувати) найбільш енергоефективний шлях його реалізації для умов реальних процесів сушіння харчової сировини.

Виклад основного матеріалу дослідження. Робота виконана в рамках концепції процесу сушіння вологої харчової сировини як еволюції термодинамічної системи до стану рівноваги. При цьому у якості термодинамічної системи можна розглядати як саму сировину яка зневоднюється так і сировину разом з сушильним агентом. У першому випадку це буде відкрита термодинамічна система яка обмінюється з навколишнім середовищем як речовиною так і енергією. У другому – закрита або ізольована термодинамічна система, в залежності від підходу до опису сушильного агента з точки зору тепломасообміну та дії зовнішніх силових полів.

Як відомо з класичної теорії термодинаміки, перехід будь-якої термодинамічної системи з одного стану до іншого пов'язаний із зміною відповідної характеристичної функції стану або, іншими словами, її певного термодинамічного потенціалу. При цьому різниця значень потенціалу дорівнює роботі всіх узагальнених сил що діють у системі. І, хоча, різниця потенціалів для даного процесу величина фіксована, і визначається лише початковим і кінцевим станами, сам процес може бути реалізований у загальному випадку нескінченною безліччю шляхів або, принаймні, детермінованою множиною на підставі аналізу передісторії процесу. Вибір шляху залежатиме від функціонального взаємозв'язку певної низки термодинамічних параметрів системи.

У якості фізичної моделі, у «першому наближенні», оберемо однокомпонентну двофазну ізольовану термодинамічну систему. Рідка фаза 1 – вода, яка знаходиться в об'ємі зневоднюваної сировини. Газова фаза 2 – водяна пара (сушильний агент). При цьому фаза 1 має кінцеву масу і об'єм, а також певну поверхню розділу з фазою 2. Відповідно, фаза 2 – нескінченний об'єм, нескінченну теплоємність і постійні (рівноважні) термодинамічні параметри для будь-якого елементарного процесу. Отже, будь-яке відхилення від рівноваги системи в цілому проходить лише у фазі 1.

Припустимо, що функціонально будь-який стан системи (як рівноважний так і нерівноважний) визначається або описується деякою множиною термодинамічних параметрів системи, які можуть незалежно змінюватися для кожного конкретного шляху еволюції системи. Тоді множину станів системи назвемо функцією деякого термодинамічного потенціалу N від заданих термодинамічних параметрів. При цьому вважатимемо, що потенціал адитивно складається з потенціалів обох фаз $N = N_1 + N_2$, і кількість елементів n параметричної множини для обох фаз однакова.

$$N(x_1, x_2, x_n; y_1, y_2, y_n) = N_1(y_1, y_2, y_n) + N_2(x_1, x_2, x_n), \quad (1)$$

де x_i, y_j – термодинамічні параметри, відповідно, для фази 2 і фази 1 ($i, j = 1, 2, \dots, n$).

Оскільки згідно з моделлю системи будь-який тепломасообмінний процес відбувається лише у фазі 1, рахуватимемо множину параметрів x_i змінними процесу, які задаються початковими умовами для кожного варіанта його реалізації та залишаються постійними за будь-яких змін в системі. У той час параметри y_j є взаємозалежними параметрами процесу, тобто функціями як множини x_i так і деякої множини y_k ($k = 1, 2, \dots, n-1; k \neq j$).

У разі нескінченно малого приросту аргумента функції y_j будуть лінійними залежностями і адитивно складатися з приростів за кожним аргументом. Таким чином, функції y_j запишемо в наступному вигляді:

$$y_j = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{i=1}^n (\alpha_{ji} x_i + \beta_{jk} y_k), \quad (k \neq j), \quad (2)$$

де α_{ji}, β_{jk} – коефіцієнти пропорційності.

У свою чергу функції y_k також є сумою відповідних залежностей від параметрів x_i

$$y_k = \sum_{i=1}^n \gamma_{ki} x_i, \quad (3)$$

де γ_{ki} – коефіцієнти пропорційності.

Перепишемо рівняння (2) з урахуванням виразу (3) для y_k :

$$y_j = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{i=1}^n (\alpha_{ji} x_i + \beta_{jk} \sum_{i=1}^n \gamma_{ki} x_i), (k \neq j). \quad (4)$$

Введемо новий коефіцієнт

$$\beta_{jki} = \beta_{jk} \cdot \gamma_{ki}, \quad (5)$$

і приведемо вираз (4) до вигляду

$$y_j = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{i=1}^n (\alpha_{ji} + \beta_{jki}) x_i, (k \neq j). \quad (6)$$

Таким чином, параметри y_j є лінійною залежністю множини параметрів x_i з певною суперпозицією коефіцієнтів α_{ji} , які назовемо коефіцієнтами «прямих ефектів» і β_{jki} – коефіцієнтів «перехресних ефектів».

У свою чергу представимо потенціал N_1 також у вигляді суми лінійних функцій від параметрів y_j

$$N_1 = \sum_{j=1}^n \lambda_j y_j, \quad (7)$$

де λ_j – відповідні коефіцієнти пропорційності.

Умовою еволюції термодинамічної системи до стану стійкої рівноваги є зменшення її термодинамічного потенціалу $dN < 0$. Оскільки, потенціал фази 2 вважаємо постійним ($N_2 = \text{const}$), то

$$dN = dN_1 < 0. \quad (8)$$

Виходячи із залежності (7) запишемо диференціал потенціалу dN у вигляді

$$dN = \sum_{j=1}^n \lambda_j dy_j < 0. \quad (9)$$

Таким чином, коефіцієнти λ_j мають сенс частинних похідних термодинамічного потенціалу за параметрами y_j

$$\lambda_j = \frac{\partial N}{\partial y_j}. \quad (10)$$

Відповідно, диференціали dy_j , згідно з виразом (6), запишемо у вигляді

$$dy_j = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{i=1}^n (\alpha_{ji} + \beta_{jki}) dx_i < 0, (k \neq j), \quad (11)$$

звідки

$$\alpha_{ji} = \frac{\partial y_j}{\partial x_i}, \quad (12)$$

$$\beta_{jki} = \frac{\partial y_j}{\partial y_k} \frac{\partial y_k}{\partial x_i}. \quad (13)$$

Для знаходження всіх коефіцієнтів необхідне теоретичне або експериментальне визначення всіх як прямих, так і перехресних функціональних залежностей

$$y_j = \sum_{i=1}^n f_{ji}(x_i) + \sum_{k=1}^{n-1} f_{jk}(y_k), (k \neq j). \quad (14)$$

Висновки. Таким чином, для дослідження модельної термодинамічної системи, відповідно до вищевикладеного алгоритму, необхідне визначення множини x_i і y_j у вигляді конкретних термодинамічних параметрів і подальше визначення відповідних функціональних залежностей. Таке завдання може бути вирішено експериментально або на підставі відомих законів та закономірностей теорії тепломасообміну.

Список літератури

1. Погожих, М. І. Наукові основи теорії й техніки сушіння харчової сировини в тепломасообмінних модулях [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук : 05.18.12 : захищена 04.06.2002 : затв. 25.11.2002. / Погожих Микола Іванович. – Х., 2002. – 212 с.
2. Погожих, М. І. Застосування методу термодинамічних потенціалів для дослідження процесу ЗТП-сушіння [Текст] / М. І. Погожих, М. М. Цуркан // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. праць / Харк. держ. ун-т. харч. та торг. – Х., 2008. – Ч.1. – С.143–150.

Отримано 01.10.2010. Харків.

© М.І. Погожих, М.М. Цуркан, 2010.