

6. Черевко, О. І. Процеси і апарати харчових виробництв [Текст] / О. І. Черевко, А. М. Поперечний. – Харків: ХДАТОХ, 2002. – 420 с.

Отримано 15.03.2009. ХДУХТ, Харків.

© Г.В. Дейниченко, З.О. Мазняк, В.В. Гузенко, 2009.

УДК 664.834.2

**М.І. Погожих**, д-р техн. наук, проф.

**М.М. Цуркан**, канд. техн. наук, доц.

## **ПРОЦЕС СУШІННЯ ЯК ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ ПЕРЕХІД ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ У СТАН РІВНОВАГИ**

*Розглянуто питання визначення енергоефективності процесу сушіння в рамках концептуального представлення процесу як еволюції термодинамічної системи до стану рівноваги.*

*Рассмотрен вопрос определения энергоэффективности процесса сушки в рамках концептуального представления процесса как эволюции термодинамической системы к состоянию равновесия.*

*The question of determination of energy efficiency of process of drying is considered within the framework of conceptual presentation of process as evolution of the thermodynamics system to the state of equilibrium.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Пошук шляхів підвищення енергоефективності технологічних процесів у харчовій промисловості, зокрема процесів сушіння різної харчової сировини є пріоритетною проблемою для галузевої науки.

**Мета та завдання статті.** Ця робота має за мету аналітичне дослідження процесу сушіння як еволюцію термодинамічної системи до стану рівноваги, з подальшим визначенням енергоефективного шляху реалізації процесу.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** В рамках даної наукової концепції процес сушіння різних матеріалів, у тому числі харчової сировини, є переходом термодинамічної системи з початкового нерівноважного стану до кінцевого рівноважного стану, який відповідає закінченню процесу сушіння. При цьому вибір варіанта термодинамічної системи може бути довільним. Якщо як така обирається зневоднювана сировина, то відповідно розглядається поведінка відкритої термодинамічної системи, яка переходить у стан рівноваги з навколишнім середовищем (сушильним агентом). Якщо ж термодинамічна система є такою, що складається з двох частин – матеріалу і сушильного агента, то вона, відповідно, описується як замкнута, поведінка якої за певних умов поблизу стану рівноваги аналогічна поведінці ізольованої

термодинамічної системи. При цьому, незалежно від вибору варіанта урахується специфіка наявних поверхонь розділу з навколишнім середовищем і між певними фазами в системі, а також багатокomпонентність системи.

У даній роботі як аналітична модель обрана однокомпонентна двофазна ізольована термодинамічна система. Однією з фаз є вода, яка знаходиться в об'ємі зневоднюваної сировини (рідка фаза 1), другою – сушильний агент (газова фаза 2). При цьому газова фаза має нескінченний об'єм і, відповідно, нескінченну теплоємність, унаслідок чого її параметри (температуру  $T_2$ , тиск  $p_2$  і хімічний потенціал  $m_2$ ) можна вважати постійними (рівноважними). Таким чином, даний процес сушіння з термодинамічної точки зору є приведенням зневоднюваного матеріалу до стану рівноваги з сушильним агентом, який відповідатиме рівноважному стану всієї термодинамічної системи. При цьому ап'оріорі є нескінченна множина шляхів реалізації процесу і лише деякі з них або певне «поле шляхів» будуть найбільш енергоєфективними. Під енергоєфективним шляхом мають на увазі варіант реалізації процесу з мінімальними питомими витратами енергії, необхідними для досягнення рівноважного вологовмісту матеріалу в поєднанні з необхідними показниками якості кінцевого продукту.

У загальному випадку вибір такого шляху є багатофакторним аналізом, що складається з декількох ланок єдиного ланцюга, починаючи з аналізу якісних показників початкової сировини, його попередньої підготовки і вибору способу сушіння з відповідними процесними параметрами. При цьому даний аналіз повинен проводитися виходячи з концепції саме термодинамічної еволюції сировини з початкового стану до стану із заданими кінцевими параметрами, що є предметом подальших досліджень.

У даній роботі автори обмежилися розглядом модельного процесу вищезгаданої двофазної системи, який відповідає процесу звичайного теплового сушіння (без дії зовнішніх силових полів). Для даної моделі пошуком енергоєфективного шляху є визначення мінімальних питомих витрат енергії, необхідних для фазового переходу води, що міститься в сировині з певною функціональною залежністю хімічного потенціалу від вологовмісту  $w$  і температури  $T$ , при заданих відхиленнях параметрів рідкої фази ( $T_1, p_1, m_1$ ) від рівноважних значень.

Відповідно до другого закону термодинаміки теплоту  $Q$ , необхідну для реалізації процесу переходу системи із стану 1 в стан 2 (з урахуванням теплоти дисипації), можна записати у вигляді:

$$Q = T \int_1^2 dS. \quad (1)$$

Очевидно, що умовою мінімальних енергетичних витрат, а значить, максимальної енергоефективності процесу, буде така умова:

$$\int_1^2 dS \Rightarrow \min, \quad (2)$$

оскільки значення інтеграла (2) буде залежати від шляху реалізації процесу, виходячи з поведінки диференціала  $dS$ , як функції певних термодинамічних параметрів.

Виходячи з класичної теорії термодинаміки (термостатики) як для системи в цілому, так і для кожної фази, в стані рівноваги виконується основне рівняння термодинаміки (рівняння Гіббса) [1]. Запишемо рівняння для фази 1 з урахуванням поверхневої енергії міжфазної поверхні:

$$T_1 dS_1 = dU_1 + p_1 dV_1 - \sigma d\Omega - \mu_1 dm_1, \quad (3)$$

де  $\sigma$  – поверхневий натяг,  $d\Omega$  – диференціал площі міжфазної поверхні;  $\mu_1$  і  $dm_1$  – відповідно хімічний потенціал і диференціал маси фази 1.

Для фази 2 рівняння Гіббса, відповідно, матиме вигляд

$$T_2 dS_2 = dU_2 + p_2 dV_2 - \mu_2 dm_2. \quad (4)$$

Для ізолюваної системи в стані рівноваги виконується умова максимуму і постійності ентропії. Отже, для диференціала  $dS$ , який адитивно складається з диференціалів двох фаз, можна записати умову екстремуму функції

$$dS = dS_1 + dS_2 = 0, \quad (5)$$

де  $dS_1$  і  $dS_2$  – відповідно диференціали ентропії фаз 1 і 2.

Оскільки для ізолюваної системи виконуються умови:

$$\begin{aligned} dU_1 + dU_2 &= 0, & dU_1 &= -dU_2; \\ dV_1 + dV_2 &= 0, & dV_1 &= -dV_2; \\ dm_1 + dm_2 &= 0, & dm_1 &= -dm_2, \end{aligned} \quad (6)$$

то перепишемо рівняння (5) з урахуванням умов (6) у вигляді

$$dS = \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) dU_1 + \left( \frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2} \right) dV_1 - \left( \frac{\mu_1}{T_1} - \frac{\mu_2}{T_2} \right) dm_1 - \frac{\sigma}{T_1} d\Omega = 0. \quad (7)$$

Рівняння (7) визначає класичні умови рівноваги двофазної системи. Оскільки всі диференціали, що входять у рівняння, незалежні, то умовами рівноваги ( $dS = 0$ ) будуть, відповідно, умови:  $T_1 = T_2$ ,  $p_1 = p_2$ ,

$m_1 = m_2$ ,  $\Omega = \text{const}$ . У той же час, це рівняння дозволяє провести аналітичний аналіз шляхів наближення термодинамічної системи до рівноваги стосовно процесу сушіння (при  $p_1 = p_2 = p$ ), виходячи з таких умов:

$$\begin{aligned} dS > 0 &\rightarrow dS = 0, \\ T_1 &\rightarrow T_2, \\ m_1 &\rightarrow m_2, \\ \Omega &\rightarrow \Omega p, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $\Omega p$  – площа міжфазної поверхні в стані рівноваги.

Для того, щоб проаналізувати шляхи наближення системи до стану рівноваги, необхідно визначити параметричну залежність величин, що входять у рівняння (7). Виходячи з умов (8), диференціал ентропії  $dS$  є функцією  $dS(T_1, m_1, \Omega)$ .

Оскільки основними параметрами, що характеризують процес сушіння, є вологовміст матеріалу  $w$  і його середньооб'ємна температура  $T$ , то хімічний потенціал  $m_1$  можна записати як функцію  $m_1(w, T_1)$ , площу  $\Omega$  – як функцію  $\Omega(w)$ . Виходячи з цього, перепишемо рівняння (7) як функцію диференціала ентропії  $dS$  від цих параметрів:

$$\begin{aligned} dS(w, T) = &\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) dU(w, T) + \left(\frac{p}{T_1} - \frac{p}{T_2}\right) dV(w) - \\ & - \left(\frac{\mu_1(w, T)}{T_1} - \frac{\mu_2}{T_2}\right) dm(w) - \frac{\sigma(w, T)}{T} d\Omega(w) \end{aligned} \quad (9)$$

Для зручності в подальшому аналізі запишемо залежність для  $dS(w, T)$  у вигляді чотирьох доданків

$$dS(w, T) = dS_U(w, T) + dS_V(w) - dS_\mu(w, T) - dS_\sigma(w, T). \quad (10)$$

Перший доданок (за наявності різниці температур фаз) визначається зміною внутрішньої енергії фази 1 при наближенні до стану рівноваги, залежно від вологовмісту матеріалу  $w$  і його температури  $T$ . Функціональна залежність  $U(w)$  визначається зміною маси фази 1, виходячи з кінетики зневоднення матеріалу, а температурна залежність  $U(T)$  – виходячи із зміни теплоємності в процесі сушіння. Обидві ці залежності апроксимуються модельними експоненціальними функціями вигляду:

$$F(w) = K_w e^{k_w w}, \quad F(T) = K_T e^{k_T T}, \quad (11)$$

де  $K_w, k_w, K_T, k_T$  – коефіцієнти апроксимації.

На підставі функцій (11) визначається функція двох змінних  $U(w, T)$  як добуток функцій  $F(w)$  та  $F(T)$

$$U(w, T) = K_{wT} \cdot F(w) F(T), \quad (12)$$

де  $K_{wT}$  – коефіцієнт пропорційності.

Виходячи з залежності (12), визначається диференціал внутрішньої енергії

$$dU(w, T) = K_{wT} \cdot [F(T) \frac{\partial F(w)}{\partial w} dw + F(w) \frac{\partial F(T)}{\partial T} dT], \quad (13)$$

який, у свою чергу, визначає функціональна поведінка доданка  $dS_U(w, T)$ . Графічний приклад функції  $dS_U(w, T)$  показано на рис. 1.

Функція  $dS_V(w)$  (за наявності різниці температур або тиску між фазами) визначається, відповідно, залежністю об'єму фази 1 від вологовмісту  $V(w)$ , яка, у свою чергу, визначається густиною фази 1 і кінетикою процесу сушіння. Залежність  $V(w)$  апроксимується експоненціальною функцією вигляду

$$V(w) = V_0 + K_V e^{k_V w}, \quad (14)$$

де  $V_0$  – початковий об'єм фази 1,  $K_V, k_V$  – коефіцієнти апроксимації. Виходячи із залежності (7), визначається диференціал  $dV(w)$  і, відповідно, функція  $dS_V(w)$  при заданих значеннях тиску і температур у фазах.

Функція  $dS_M(w, T)$  визначається двома функціональними залежностями  $m_1(w, T)$  і  $m(w)$ . Залежність хімічного потенціалу фази 1  $m_1(w, T)$  визначається експериментально за ізотермами сорбції зневоднюваного матеріалу і апроксимується функцією

$$\mu_1(w, T) = K_\mu e^{-(k_\mu w + k_{\mu T} T)}, \quad (15)$$

де  $K_\mu, k_\mu, k_{\mu T}$  – коефіцієнти апроксимації.

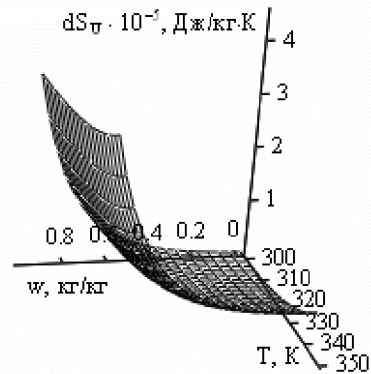


Рисунок 1 – Залежність доданка диференціала ентропії  $dS_U$  від температури  $T$  і вологовмісту  $w$

Функція  $m(w)$  фактично є кінетичною кривою, яка також апроксимується експоненціальною функцією

$$m(w) = K_m e^{k_m w} \quad (16)$$

з відповідними кінетичними коефіцієнтами  $K_m$  і  $k_m$ . За функцією (16) визначається диференціал  $dm(w)$  і далі остаточний вигляд доданка  $dS_m(w, T)$ . Графічний вигляд функції  $dS_m(w, T)$  показано на рис. 2а. Як видно з рисунка, функція  $dS_m(w, T)$  є деякою поверхнею, яка має «рівноважний» перетин  $dS_m(w, T) = 0$  (рис. 2б), вигляд якого залежатиме від умов (шляхів) реалізації процесу. При рівності нулю решти доданків у залежності (10) цей перетин визначатиме рівноважний стан всієї системи в цілому.

Функціональна залежність доданка  $dS_\sigma(w, T)$  визначається виглядом функцій  $\sigma(w, T)$  і  $\Omega(w)$ . Залежність поверхневого натягнення від вологовмісту матеріалу визначається поглибленням зони випаровування, що, у свою чергу, визначає кривизну поверхні випаровування в межах від плоскої (вільної) поверхні до мікрокапілярів. Залежність поверхневого натягу від температури вибирається з експериментальних даних для певного виду матеріалу. Як правило, такі залежності носять також експоненціальний характер і апроксимуються функцією вигляду

$$\sigma(w, T) = K_\sigma e^{-(k_{\sigma w} w + k_{\sigma T} T)}, \quad (17)$$

де  $K_\sigma$ ,  $k_{\sigma w}$ ,  $k_{\sigma T}$  – коефіцієнти апроксимації.

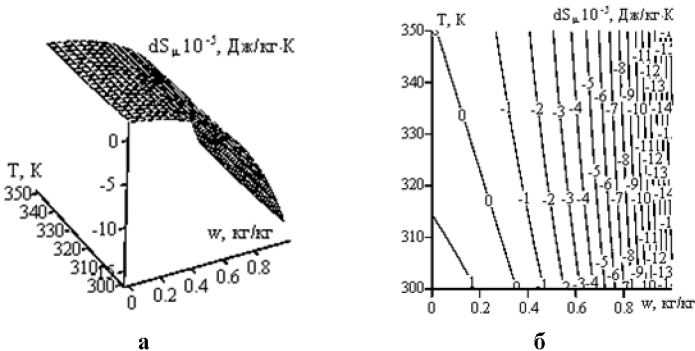


Рисунок 2 – Залежність доданка диференціала ентропії  $dS_\mu$  від температури  $T$  і вологовмісту  $w$  (а); рівноважний перетин  $dS_\mu = 0$  (б) (—0—0—0—)

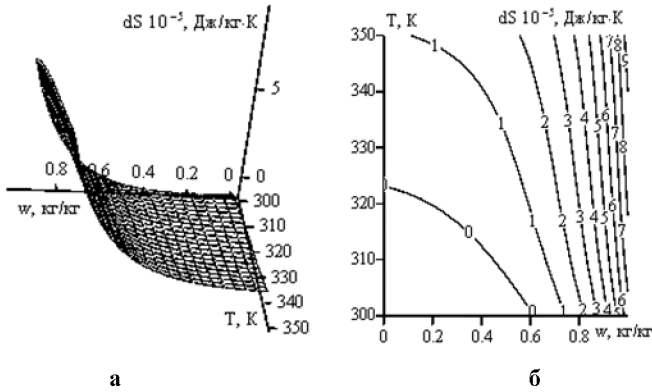


Рисунок 3 – Залежність повного диференціала ентропії  $dS$  від температури  $T$  і вологовмісту  $w$  (а); рівноважний перетин  $dS = 0$  (б) (—0—0—)

Залежність площі міжфазної поверхні від вологовмісту в першому наближенні узгоджується з відповідною зміною об'єму фази 1 і носить ідентичний функціональний характер.

Слід врахувати, що для спрощення розв'язання задачі у першому наближенні доданком  $dS_{\sigma}(w, T)$  можна знехтувати, оскільки побічно поверхневу енергію можна враховувати в залежності хімічного потенціалу фази 1 від вологовмісту, яка, у свою чергу, ураховує зміну енергії зв'язку води з матеріалом при зміні вологовмісту.

У результаті, задавши функціональні залежності всіх доданків у виразі (7), ми одержуємо сумарну функцію  $dS(w, T)$ , вигляд якої визначає шляхи наближення системи до стану рівноваги, яка визначатиметься відповідним перетином  $dS(w, T) = 0$ . Приклад графічної залежності  $dS(w, T)$  показано на рис. 3а, а відповідний їй вигляд перетину  $dS(w, T) = 0$  на рис. 3б

Інтегрування функції  $dS(w, T)$  в заданих межах за вологовмістом та температурою дає величину пропорційну теплоті фазового переходу і характеризує термодинамічну ефективність процесу для різних умов його реалізації.

$$\int_{w_0}^{w_k} \int_{T_1}^{T_2} dS(w, T) dwdT \Rightarrow \min. \quad (18)$$

**Висновки.** Таким чином, аналіз умов проведення процесу сушіння, як еволюції відповідної термодинамічної системи до стану рівноваги, з використанням рівняння Гіббса дає можливість визначити його енергоефективність і, відповідно, задати параметри для реалізації процесу з максимальною енергоефективністю.

*Список літератури*

1. Гиббс, Дж. В. Термодинамические работы [Текст] / Дж. В. Гиббс. – М. ; Л. : Гостехиздат, 1950. – 492 с.

Отримано 15.03.2009. ХДУХТ, Харків.

© М.І. Погожих, М.М. Цуркан, 2009.

УДК 656.073.5:351.761.3

**Г.В. Дейниченко**, д-р техн. наук

**Н.О. Афукова**, канд. техн. наук

**А.М. Кукса**, студ.

**АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ СВІТОВОГО  
РИНКУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ МИТНОГО КОНТРОЛЮ  
ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ НАРКОТИЧНИХ РЕЧОВИН**

*Визначено основні тенденції розвитку світового ринку технічних засобів митного контролю, які спроможні виявляти та ідентифікувати наркотичні речовини.*

*Определены основные тенденции развития мирового рынка технических средств таможенного контроля, которые выявляют и идентифицируют наркотические вещества.*

*The analysis of tendencies of world market development of technical means ocustoms supervision for the detection of drugs.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Україна, як незалежна держава, продовжує нарощувати зовнішньоекономічні зв'язки, що зумовлює необхідність адекватного розвитку митної служби. Зростання кількості суб'єктів зовнішньоекономічної діяльності, розширення номенклатури товарів, які експортуються та імпортуються, загострюють проблему митного контролю цих потоків. Україна, продовжуючи політику на інтегрування до Європейської Спільноти, є ак-