

# СТАБІЛІЗАЦІЯ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ В СИСТЕМАХ ВИРОБНИЦТВА СОЛОДІВ

Олександр Шевченко, Анатолій Соколенко,  
Сергій Бут, Олег Степанець

Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна

**Вступ.** Процеси пророщування зернової маси здійснюються в умовах термодинамічної стабілізації показників температури, вологості, присутності кисню і вилучення  $\text{CO}_2$ , що потребує витрат кондиціонованого повітря біля  $1000 \text{ м}^3$  на 1 т зерна за 1 год. За різних вхідних параметрів повітря його наступна підготовка повинна привести до температурної стабілізації на показнику  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  і відносної вологості 100 %.

**Мета дослідження** – розробити пропозиції по удосконаленню технологій кондиціонування повітряних потоків.

**Матеріали і методи** стосуються положень термодинаміки і феноменологічних узагальнень.

**Результати досліджень.** Виконаний аналіз приводить до висновку про можливість і доцільність суміщення операцій нагрівання і зволоження свіжого повітря за рахунок введення в останній водяної пари. Перебіг такого процесу відобразимо діаграмою I-d на рис. 1.

Перехід від точки 1 до точки 2 може співпадати або перевищувати положення кривої  $\varphi = 100 \%$ , однак досягнення кінцевої температури  $t_{(к)}$  =  $t_{(н)}$  одночасно повинно приводити до повного насичення повітря водяною парою. Очевидно, що перебіг процесу і його кінцевий результат залежать у тому числі й від параметрів пари. При цьому має виконуватися співвідношення

$$Q = V_{\text{с.п.}} \cdot c_{\text{с.п.}} \cdot (t_{(к)} - t_{(н)}) + i_{\text{пар}} \cdot M_{\text{пар}}, \quad (1)$$

де  $M_{\text{пар}}$  – маса пари, що подається на процес;  $i_{\text{пар}}$  – ентальпія пари.

Звідси з точки зору інтересів досягнення номінальної температури

$$M_{\text{пар}} = \frac{V_{\text{с.п.}} \cdot c_{\text{с.п.}} \cdot (t_{(к)} - t_{(н)})}{i_{\text{пар}}}. \quad (2)$$

витрати пари повинні скласти

Однак при цьому можуть виникати три умови, а саме:

$$M_{\text{пар}} > (d_{(к)} - d_{(н)}) V_{\text{с.п.}} \rho_{\text{с.п.}}; \quad (3) \quad M_{\text{пар}} = (d_{(к)} - d_{(н)}) V_{\text{с.п.}} \rho_{\text{с.п.}}; \quad (4)$$

$$M_{\text{пар}} < (d_{(к)} - d_{(н)}) V_{\text{с.п.}} \rho_{\text{с.п.}}; \quad (5)$$

Умова (3) відповідає співвідношенню потоків, за якого частина пари буде сконденсована, а друга частина стане складовою повітря, насиченого до  $\varphi = 100 \%$ . Виразу (4) відповідає випадок, за якого пара повністю стає складовою повітря, а за ситуацією, що відповідає рівнянню (5)

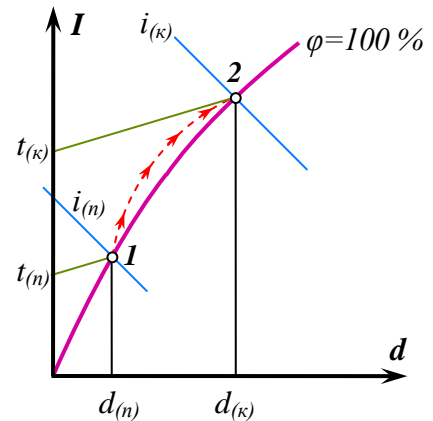


Рис. 1. Діаграма I-d, з відображенням процесу змішування повітря і водяної пари

номінальний температурний режим повітря досягається. Однак при цьому відносна вологість  $\varphi < 100\%$ .

В останньому випадку донасичення повітря вологою повинно здійснюватися за рахунок розпилювання в ньому води з номінальною температурою.

Очевидно, що у більшості випадків в зимові періоди виникає необхідність догрівання повітря і підвищення його ентальпії. Остання для вологого повітря визначається на основі принципу суперпозиції, за яким

$$i_{\text{вол.п.}} = i'_{\text{с.п.}} + i_{\text{п}}, \quad (6)$$

де  $i'_{\text{с.п.}}$  – ентальпія сухого повітря;  $i_{\text{п}}$  – ентальпія водяної пари.

Підстановка значень  $i'_{\text{с.п.}}$  та  $i_{\text{п}}$  приводить до форми

$$i_{\text{вол.п.}} = c_p t + (2500 + 1,93)t, \text{ кДж/кг}. \quad (7)$$

Оскільки для зимового часу є характерним низьке значення абсолютного вологовмісту, то його насичення до  $\varphi = 100\%$  і підвищення температури є одночасно виконуваними операціями. При цьому загальні енергетичні витрати визначаються різницею ентальпій повітря за кінцевих і початкових термодинамічних параметрів.

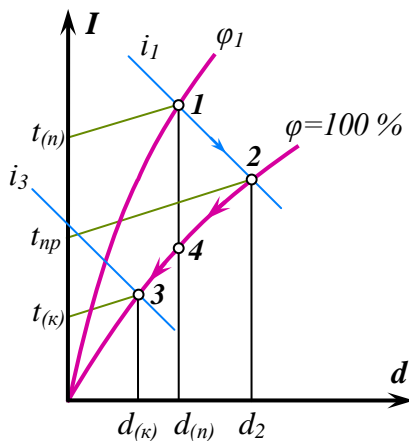


Рис. 2. Схема щодо визначення послідовності операцій в I-d діаграмі

Кондиціонування повітря в літній період має свої відмінності, завдяки яким слід розглянути особливості і послідовність виконання операцій зміни термодинамічних параметрів. Координати точки початкових значень термодинамічних параметрів визначаються величинами температури і відносної вологості (рис. 2). При цьому кінцеві значення параметрів також відомі і складають величини  $t_{(к)} = 10\text{ }^\circ\text{C}$  та  $\varphi = 100\%$ .

Нехай зазначеним координатам і параметрам на діаграмі відповідають точки 1 та 3, а точка 2 відповідає параметрам повітря за його повного вологонасичення до  $\varphi = 100\%$ . Якщо вологонасичення прийнято за першу операцію, то її завершення забезпечує лише номінальне значення відносно вологості, а номінальна температура при цьому не досягається. Для забезпечення останньої необхідно здійснювати подальше охолодження вологонасиченого повітря.

З діаграми (рис. 2) видно, що подальша трансформація термодинамічних параметрів вологонасиченого повітря супроводжується зниженням абсолютного вологовмісту від значення  $d_2$  до  $d_{(к)}$ . Очевидно, що з фізичної точки зору це означає присутність режиму конденсації водяної пари, енергетичною вартістю якого буде відведення теплоти конденсації і

з діаграми (рис. 2) видно, що подальша трансформація термодинамічних параметрів вологонасиченого повітря супроводжується зниженням абсолютного вологовмісту від значення  $d_2$  до  $d_{(к)}$ . Очевидно, що з фізичної точки зору це означає присутність режиму конденсації водяної пари, енергетичною вартістю якого буде відведення теплоти конденсації і

$$\Delta i_{1-2} = 0; \quad \Delta i_{2-3} = i_2 - i_3, \quad (8)$$

Результатом такого процесу буде досягнення стану термодинамічної рівноваги вологого повітря з параметрами точки 3, а навантаження на холодильну установку при цьому відповідатиме значенню  $\Delta i_{2-3}$ .

Охолодженню повітря без попереднього вологонасичення на діаграмі відповідає відрізок 1-4 і точки 4 відповідають температура  $t_4 > t_3$  та ентальпія  $i_4 > i_3$ . При цьому маємо

$$\Delta i_{1-4} = i_1 - i_4; \quad (9) \quad \Delta i_{4-3} = i_4 - i_3, \quad (10)$$

а навантаження на систему охолодження повітря складе

$$q_{x.y.} = \Delta i_{1-4} + \Delta i_{4-3} = i_1 - i_4 + i_4 - i_3 = i_1 - i_3. \quad (11)$$

Оскільки в ізоентальпійному процесі маємо  $i_1 = i_2$ , то звідси витікає, що вибір на користь першого або другого варіантів на результат щодо навантаження системи охолодження не впливає.

**Висновки.** Проте, якщо стосовно матеріального балансу різниця відсутня, то мають місце і відмінності. Здійснення процесу охолодження по дузі 2-3 на кривій  $\varphi = 100\%$  повинно супроводжуватися конденсацією вологи в кількості  $d_2 - d_3$ . Однак перебіг конденсації означає необхідність присутності відповідних умов, центрів конденсації, енергетичного забезпечення, створення міжфазної поверхні тощо. Враховуючи швидкоплинність перебігу вказаного процесу і названі умови можливо прийти до висновку про перебування повітря у метастабільному стані, тобто у стані перенасичення вологою складовою.

Взаємодія такого повітря з зерновою масою, температура якої на 2...3 °С вища, не повинна супроводжуватися конденсацією, але по мірі зростання температури повітря рівень його термодинамічної нерівноваги зменшується і зменшується осушувальна здатність.

#### Література

1. Енергетичні трансформації і енергозбереження в харчових технологіях: монографія / А.І. Соколенко та ін. Київ: Фенікс, 2012. 484 с.
2. Енергоматеріальні потоки харчових і мікробіологічних виробництв: монографія / А.І. Соколенко та ін.; за ред. д-ра техн. наук, проф. Соколенка А.І. Київ: Кондор-Видавництво, 2016. 326 с.