

УПРАВЛІННЯ ВНУТРІШНІМ ОПОРОМ ДИФУЗІЇ ВОЛОГИ

Гапонюк І.І., д-р техн. наук, професор Національний університет харчових технологій,

Гапонюк О.І., д-р техн. наук, професор
Одеська національна академія харчових технологій

Анотація: виділено ряд факторів впливу на енергію внутрішньої дифузії вологи капілярно-пористих колоїдних тіл, теоретично обґрунтовано та експериментально доведено можливість управління ними, отримано математичне описання управління окремими факторами впливу на енергію внутрішньої дифузії вологи встановленими способами.

Ключові слова: зерно, волога, зневоднення, опір дифузії вологи, рушійний потенціал.

Annotation: the row of factors of influence on energy of internal diffusion of moist of capillary porous colloid bodies is selected, in theory grounded and experimental management possibility is well-proven by them, mathematical description of management of influence on energy of internal diffusion of moisture separate factors is got by the set methods.

The keywords: grain, moisture, dehydrations, resistance of diffusion of moisture, motive potential.

Із збільшенням швидкості конвективних способів зневоднення капілярно-пористих тіл зростають енерговитрати сушіння та втрати теплоти із відпрацьованими робочими газами. Втрати можуть перевищувати розрахунково-необхідні витрати зневоднення в 2,5 ... 4,5 разів. Загально-прийнято ці додаткові витрати енергії сушіння зерна, що перевищують енергію фазових перетворень вологи в зневожуваних тілах, пов'язують із опором внутрішньої дифузії вологи [2, 3, 5].

М.Ф.Казанський, методом індикатору, та В.М.Казанський, за допомогою ізотермічного калориметру, дослідним шляхом встановили залежність приросту питомої теплоти випаровування вологи Δr від вологовмісту капілярно-шпаруватого матеріалу [3]. При визначенні показника Δr автори використовували відоме рівняння Гіббса-Гельмгольца:

$$\Delta I = \Delta F + T \cdot \Delta S, \quad (1)$$

де ΔI - тепловий ефект зв'язування води, або інакше: $\Delta I = \Delta r = r_u - r$, де r_u і r - теплота випаровування вологи із тіла при вологовмісті u та із відкритої поверхні; ΔF - вільна енергія зв'язку; ΔS - ентропія зв'язку вологи.

Метод В.М.Казанського був застосований також науковцями НУХТ і ОНАХТ для встановлення кількісної характеристики опору внутрішньокапілярної дифузії й отримання залежності енергії зв'язку вологи із зневоджуваним тілом.

В залежності від вмісту та умов перебування в зернині, фізико-механічна волога може перебувати в рідкому, комбінованому та газоподібному стані. В капілярах волога утримується силами капілярного потенціалу [1 - 3]. Для змочуваних рідин, таких як вода, капілярний потенціал є від'ємним.

Висота «підняття» вологи в капілярі визначається із рівняння рівноваги сил, що діють по периметру меніска [1, 5], з одного боку тиском P :

$$P = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sigma \cdot \cos \theta, \quad (2)$$

з другого - масою стовпа вологи висотою h :

$$M = \pi \cdot R^2 \cdot h \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_n), \quad (3)$$

Звідки висота стовпця підняття води в капілярі:

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{R \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_n)}, \quad (4)$$

Із (4) очевидна відсутність впливу зовнішнього тиску на осмотичний, а отже і висота рівня вологи в капілярі не пов'язана з зовнішнім тиском. Проте зовнішнім тиском можна суттєво впливати на внутрішньопорове газове середовище капілярно-пористих тіл з порами, що відносяться до мікрокапілярів.

Із відомої моделі дифузії вологи [1 - 5], рушійними силами як зовнішньої так і внутрішньої дифузії вологи та теплоти у вигляді конвективної та молекулярної (іноді мольної) дифузії в процесах зневоднення матеріалу є різниця тисків (∇P), концентрацій (∇U) та температури (∇T).

У випадку конвективного способу зневоднення зерна, тобто зовнішнього підведення теплоти та сорбції вологи газами, інтенсивність вологообміну J_3 може змінюватися від нульового значення до величини внутрішньої дифузії вологи на поверхню зернини J_b . Величина J_3 пропорційна потенціалу рушійних сил і може бути описана різноманітними виразами, які є похідними формул Дальтона та Ньютона. Для стаціонарних умов конвективного зневоднення можуть бути представлені у вигляді:

$$J_m = a_m \cdot \nabla P, \quad (7)$$

$$\text{та } J_t = a_t \cdot \nabla T, \quad (8)$$

де ∇P та ∇T - градієнти тиску та температури доквілля і поверхні тіла; a_m та a_t - відповідні коефіцієнти пропорційності.

Для розрахунку тиску пари капілярно-зв'язаної вологи, що перебуває безпосередньо в тілі зернини та над його поверхнею, за ізотермічних умов і незначного перепаду температури, часто використовують формули Томсона [2]:

$$\varphi = \exp\left(-\frac{2 \cdot \sigma \cdot p_n \cdot \cos \theta}{\rho_{жс} \cdot p_u \cdot r}\right) \quad (9)$$

$$\varphi = 100 \cdot \frac{P_h}{P_o} = \exp\left(-\frac{\Delta \rho \cdot g \cdot h \cdot M}{\rho_l \cdot R \cdot T}\right) \quad (10)$$

де $\Delta \rho = (\rho_l - \rho_v)$ - різниця густини рідини та пари; g - прискорення вільного падіння; φ - відносна вологість або відносний тиск пари; T - температура газу; R - універсальна газова стала.

Проте ці вирази (9) та (10) на всьому інтервалі сушіння складно застосувати для розрахунків кількісної характеристики по причині великої розбіжності з результатами дослідів [2, 4, 7]. Однак вони дозволяють виконувати якісний аналіз процесів зовнішнього тепломасообміну. Із цих виразів видно, що величина рушійного потенціалу (∇P) знаходиться в прямій залежності від температури газів T , їхньої густини ρ та в зворотній від молекулярної маси M . В наведених експериментальних дослідженнях Andrea N. та Chuanping Liu [6, 7] доведена можливість застосування цього підходу для широкого діапазону зневоджуваних тіл [6, 7], а Chuanping Liu крім цього пропонує ввести фактор «перемінного газового потоку» [7], який ще значно раніше виокремлювали в своїх дослідженнях науковці ОНАХТ – професора Гришин М.А., Остапчук М.В. та Бурдо О.В.

Тому опускаючи добре досліджені вітчизняними та зарубіжними науковцями чинники тепломасообміну, пропонуємо детальніше зупинитися на малодосліджених – факторі впливу стану газового середовища в різноманітних порах зневоджуваного капілярно-пористого колоїдного тіла. Як вже нами раніше згадувалося, при конвективному зневодненні капілярно-пористих колоїдних тіл не можна ігнорувати градієнтом внутрішньокапілярного тиску газів та поширову в тілі зернини значення різниць тисків ($\nabla P_{кан}$) на інтенсивність тепловологообміну. За умов інтенсивного вологообміну ця складова може зростати до 80 % і більше відсотків від загальної величини опору внутрішньокапілярної дифузії вологи, а отже стан газового середовища в мікрокапілярах в цьому раці буде домінувати в загальному балансі енерговитрат міжфазового зневоднення.

За результатами експериментальних досліджень нами було уточнено коефіцієнти пропорційності в напівемпіричних рівняннях конвективного зневоднення малорухомого шару зерна товщиною 0,25 м для умов наближених до виробничих.

На рис.1 і 2 в графічному вигляді представлено вплив градієнту внутрішньокапілярного тиску газів $\nabla P_{кан}$ та співвідношення внутрішньокапілярної різниці тисків тіла зернини від енергії зневоджуваних газів.

Експериментальними дослідженнями було підтверджено залежність та уточнено чисельні значення $\nabla P_{кан}$ конвективного способу зневоднення від перемінних факторів: початкової вологості тіла зернини W_0 , лінійних розмірів тіла зернини (геометричного коефіцієнту пропорційності), швидкості зневоднення $dW/d\tau$ та наявності порожнин тіла:

$$\Delta H_p = (a/W) \cdot (l/c) \cdot \left(\frac{dW}{d\tau}\right)^b, \quad (11)$$

де a, b, c - коефіцієнти пропорційності встановлюються дослідним шляхом.

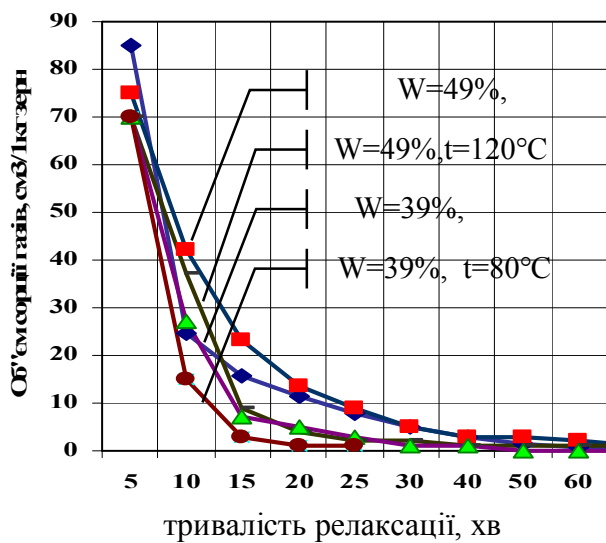


Рис. 1. Динаміка вирівнювання ∇P_{kan}

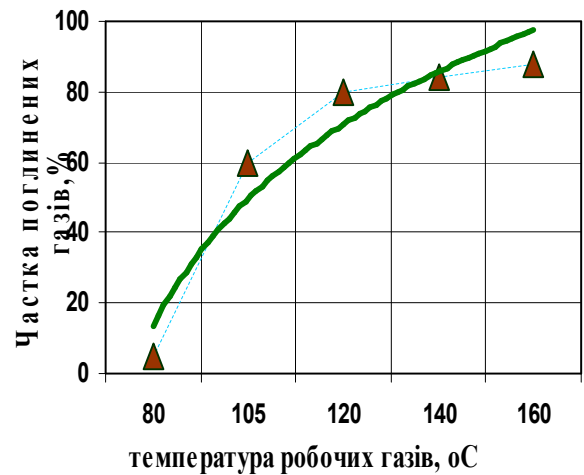


Рис.2. Залежність внутрішньокапілярного тиску від енергії робочих газів, ($W=39\%$, $v=0,14\text{м/с}$)

Із виразу (11) слідує, що на величину ∇P_{kan} суттєво впливають розміри капілярів та лінійні розміри зневоджуваного тіла. З огляду на це, слід пов'язувати режими сушіння із геометричним коефіцієнтом зневоджуваного тіла.

Вказаний геометричний коефіцієнт можна виразити через співвідношення площі поверхні контакту масообміну S до відстані l від поверхні контакту до найбільш віддаленої точки тіла зернини в напрямі градієнту вологовмісту (∇W):

$$K_{као} = S/l, \quad (12)$$

де S – площа поверхні контакту масообміну, м^2 ; l – відстань від поверхні контакту до найбільш віддаленої точки тіла зернини в напрямі градієнту вологовмісту.

На підставі експериментальних даних, для періоду незмінної швидкості зневоднення зерна отримано математичне описання залежності стану внутрішньокапілярного тиску газів від початкового вологовмісту зерна та енергії робочих газів:

$$\Delta E = \left(\frac{\Delta V_{BK} \cdot \rho_B}{F_K} \right) \cdot \left(1 - \frac{dW_l}{dW_\phi} \right) - \left[V_{ГК} \cdot \left(1 + \frac{\Delta T}{T} \right)^K \right], \quad (13)$$

де V_z – об'єм порожнин зернини, що незаповнені рідинною вологою, $\text{см}^3/\text{кг}$ зерна; δ_z – частка поглинутих зерном газів до загального об'єму вилученої із зернини води, %; θ – температура зерна, $^{\circ}\text{C}$; t_l – температура робочих газів, $^{\circ}\text{C}$.

За результатами досліджень було підтверджено вплив стану газів в капілярах зернини (градієнт внутрішньокапілярного тиску газів ∇P_{kan} та співвідношення внутрішньокапілярної різниці тисків в шарах тіла зернини) на інтенсивність міжфазового тепловологообміну. Одночасно із цим встановлено зв'язок стану газів із потенціалом використання енергії робочих газів, пошарової однорідності в тілі зернини та інтенсивності вологообміну.

Висновки:

1. З поглибленням зони зневоднення капілярно-шпаруватого тіла внутрішній опір дифузії води Δr зростає та є неоднаковим по довжині капіляру.

2. На величину внутрішнього опору дифузії води Δr суттєво впливають градієнт внутрішньокапілярного тиску газів ∇P_{kan} та співвідношення внутрішньокапілярної різниці тисків в шарах тіла зернини. Для нівелювання впливу цих показників застосовують спосіб збільшення рушійного потенціалу

робочих газів підвищенням їх температури, що може спричинити пошарову в тілі неоднорідність вологовмісту і температури та небажаних хімічних змін.

3. Для зневоднення зерна, особливо із підвищеним вологовмістом та більшими розмірами зернин, технологічно доцільними є спадних режимів сушіння.

4. Змінням градієнту рушійних потенціалів ∇P , застосуванням короткотривалого припинення підведення робочих газів на завершальному етапі зневоднення зерна ($\tau = 5 \dots 15$ хв), можна суттєво зменшити втрати теплоти із відпрацьованими газами та вирівняти пошарову однорідність тепло-вологодобміну зернини

Література:

1. Флауменбаум Б.Л. Основы консервирования пищевых продуктов / Б.Л. Флауменбаум, С.С. Танчев, М.А. Гришин // М.: Агропромиздат., - 1986. – 494 с.
2. Остапчук Н.В. Повышение эффективности сушки зерна./ Н.В. Остапчук, А.Б. Шашкин, В.Д. Каминский // – Киев: Техника, 1988. – 180 с.
3. Гапонюк І.І. Удосконалення технології сушіння зерна. – Одеса.: Поліграф, 2009. – 182 с.
4. Гапонюк І.І. Зменшення внутрішнього опору дифузії вологи// – Одеса.: Зернові продукти і комбікорми, 2009 № 2 – С.43 – 49.
5. Sullikan W.N. Heat transfer to flowing granular media / W.N. Sullikan, R.H. Sabersky // Heat and Mass Transfer. – 1975. – vol.18. № 11. – P.97 – 107.
6. Andrea N. Drying characteristics of amaranth grain / Andrea N. Calzetta Resio, Roberto J. Aguerre, Constantino Suarez // Original Research Article Journal of Food Engineering. – Vol. 65 Issue 2, November 2004. – Pages 197–203.
7. Chuanping Liu. Size distribution in gas vibration bed and its application on grain drying / Chuanping Liu, Li Wang, Ping Wu, Fei Xiang // Original Research Article Powder Technology, – Vol. 221, May 2012. – Pages 192 –198.