

Література

1. Егоров Г.А., Мельников Е.М., Журавлев Б.Ф. Технология и оборудование мукомольно-крупяного и комбикормового производства. – М.: Колос, 1979. – 368 с.
2. Микроструктурные изменения, происходящие в семенах гороха при гидротермической обработке / Е.М. Мельников, Т.А. Бильгаева; Иркутский гос. ун-т им. А.А. Жданова, Восточно-Сиб. технол. ин-т. – М., 1985. – С 8. – Деп. в ВИНТИ 2.04.85. – № 545 г-Д85.
3. Мухтарова М.Р., Ловачева Г.Н. Крахмал бобовых культур и его физико-химические свойства // Науч.-техн. реф. сб. / ЦНИИТЭИ Пищепром. Сер. Крахмало-паточная пром-сть. – 1972. – С. 41-47.
4. Орлов А.И., Афанасьев В.А. Влияние пропаривания и экструдирования на микроструктуру зерна ячменя // Тр. ВНИИКП, 1984. – Вып. 25. – С. 67-72.
5. Ошкунис В. Комбикорм с плющеным зерном // Комбикормовая пром-сть. – 1991. – № 3. – С. 34.
6. Папков С.П., Фрайберг Э.З. Взаимодействие целлюлозы и целлюлозных материалов с водой. – М.: Химия, 1976. – 60 с.
7. Попова Е.П., Веселовская Т.И., Мантейфель Л.В. Особенности микроструктуры семян бобовых культур. – М.: 1985. – 19 с. – Деп. в ВИНТИ 7.06.85; № 56932-Д85.

УДК 664.72.047,54:005.591.6

УПРАВЛІННЯ ВНУТРІШНІМ ОПОРОМ ДИФУЗІЇ ВОЛОГИ**Гапонюк І.І., д-р техн. наук, професор****Національний університет харчових технологій, м. Київ****Гапонюк О.І., д-р техн. наук, професор****Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса**

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.

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.

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

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. Загальноприйнято ці додаткові витрати енергії сушіння зерна, які перевищують енергію фазових перетворень вологи в зневожуваних тілах, пов'язувати з опором внутрішньої дифузії вологи [2, 3, 5].

М.Ф. Казанський, методом індикатору, за допомогою ізотермічного калориметра, дослідним шляхом встановлено залежність приросту питомої теплоти випаровування вологи Δr від вологовмісту капілярно шпаруватого матеріалу [3]. При визначенні показника Δr М.Ф.Казанський використовував 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 зневожуваним тілом.

Залежно 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 із 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:

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

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 через велику розбіжність із 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 – професори Гришин М.О., Остапчук М.В. та Бурдо О.Г.

Тому опускаючи добре досліджені вітчизняними та зарубіжними науковцями чинники тепломасообміну, пропонуємо детальніше зупинитися на малодослідженому – 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 поширенню в тілі зернини значення різниць тисків (∇P_{kan}) на інтенсивність тепловологообміну. За умов інтенсивного вологообміну цей складник може зростати до 80 % і більше відсотків від загальної величини опору внутрішньокапілярної дифузії вологи, а отже, стан газового середовища в мікрокапілярах у цьому разі буде домінувати в загальному балансі енерговитрат міжфазового зневоднення.

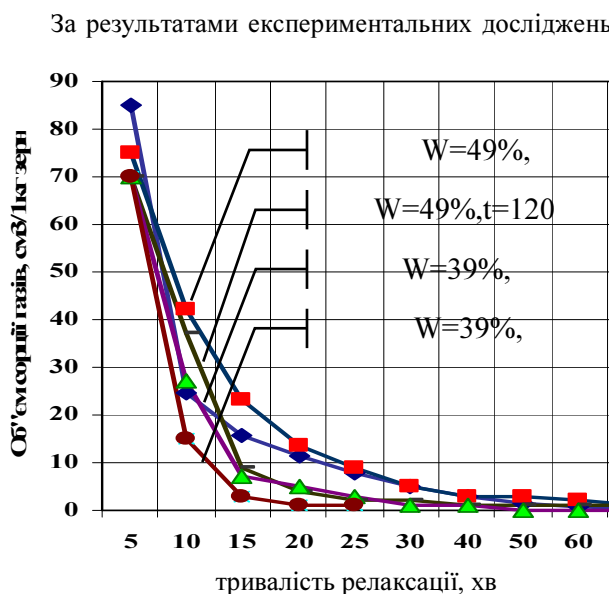


Рис. 1 – Динаміка вирівнювання $\nabla P_{кан}$

пропорційності), швидкості зневоднення dW/dt та наявності порожнин тіла:

$$\Delta H_P = (a/W) \cdot (l/c) \cdot (dW/dt)^b, \quad (11)$$

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

Із виразу (11) випливає, що на величину $\nabla P_{кан}$ 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 градієнта вологовмісту (∇W):

$$K_{КАО} = S/l, \quad (12)$$

де S – площа поверхні контакту масообміну, m^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:

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

де V_2 – об'єм порожнин зернини, що незаповнені рідинною вологою, $см^3/кг$ зерна; δ_2 – частка поглинутих зерном газів до загального об'єму вилученої із зернини вологи, %; θ – температура зерна, $^{\circ}C$; t_l – температура робочих газів, $^{\circ}C$.

За результатами досліджень було підтверджено вплив стану газів у капілярах зернини (градієнт внутрішньокапілярного тиску газів $\nabla P_{кан}$ та співвідношення внутрішньокапілярної різниці тисків у 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.

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 у графічному вигляді представлено вплив градієнта 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 коефіцієнта

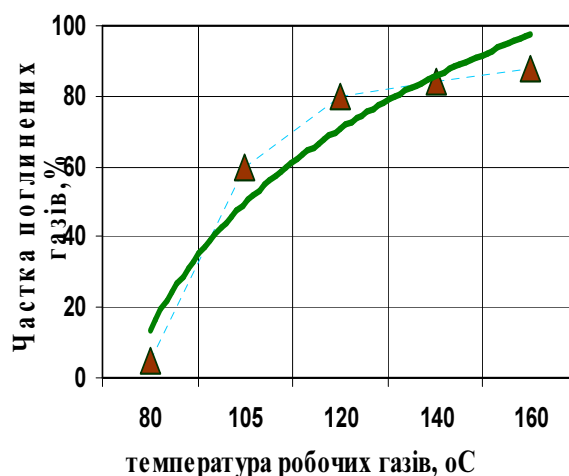


Рис. 2 – Залежність внутрішньокапілярного тиску від енергії робочих газів, ($W=39\%$, $v=0,14m/c$)

Висновки

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

2. На величину внутрішнього опору дифузії вологи Δr суттєво впливають градієнт внутрішньокапілярного тиску газів $\nabla P_{\text{кам}}$ та співвідношення внутрішньокапілярної різниці тисків у 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 спадні режими сушіння.

4. Зміненням градієнта 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. – 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. – P. 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. – P. 192–198.

УДК 664.72.047,54:005.591.6

КІНЕТИКА НАГРІВАННЯ ВОЛОГОГО ШАРУ ЗЕРНА ГАЗАМИ ПІДВИЩЕНОГО ВОЛОГОВМІСТУ

Гапонюк І.І., д-р техн. наук, професор
Національний університет харчових технологій, м. Київ
Гапонюк О.І., д-р техн. наук, професор
Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса

Теоретично обґрунтовано режими та експериментально доведено можливість прискореного нагрівання малорухомого шару зерна робочими газами підвищеного вологовмісту, математично опрацьовано кінетику змін параметрів шару зерна та встановлено раціональні параметри течії робочих газів, отримано математичне описання управління окремими факторами впливу на міжфазовий тепло масообмін за встановленими способами.

In theory grounded modes and possibility of the pri-skorenogo heating of not mobile layer of grain is experimentally well-proven by workings gases of enhanceable vologovmistu, matemati-chno kinetics of changes of parameters of layer of grain is worked out and the rational parameters of flow of workings gases are set, mathematical description of management of influence separate factors is got on line-to-line warmly mass-transfer after the set methods

Ключові слова: зерно, сушіння, волога, теплота, гази, нагрівання.