

APPLIED RESEARCHES OF THE SPECIFIED MODEL OF CAPILLARY DIFFUSION OF MOISTURE

I. Gaponyuk

National University of Food Technologies

Key words:

Drying regimes
Drying
Heat
Moisture
Bulk capillary-porous body
Capillaries
Driving capacity
Heat transfer
Mass transfer
Gas workers
Intra-capillary resistance
Moisture diffusion
Driving potential
Aerodynamic drag

Article history:

Received 14.04.2014
Received in revised form
26.04.2014
Accepted 15.05.2014

Corresponding author:

I. Gaponyuk
Email:
zenidtar@gmail.com

ABSTRACT

Experimental researches are executed to clarify the mechanism of capillary diffusion of moisture in the capillary-porous bodies of different moisture content. The factors of influence of sizes and height of layer of dehumidified bodies, methods of tricking into of workings gases and energy of workings gases are set. Semi-empirical equations of influence of these factors are got on kinetics of drying and smoothing of capillary resistance of diffusion of moisture. The technological coefficients of calculations of the modes of drying are obtained; the expedience of using the descending modes of drying is theoretically studied and experimentally confirmed. The possibility of using working gases of high moisture content for regulating Kirpichev criterion is experimentally set and theoretically grounded. The influence of aerodynamic factors in the growth of energy resistance of capillary diffusion of moisture in capillary-porous bodies under conditions of convective heat transfer is analyzed. A dominant influence on the aerodynamic drag resistance of intra-capillary diffusion of moisture is established, as well as impact factors and ways to manage this resistance. Modes increasing the driving potential of inter-phase moisture exchange when maintaining constant interfacial energy of working gas are substantiated.

ПРИКЛАДНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УТОЧНЕНОЇ МОДЕЛІ ВНУТРІШНЬОКАПІЛЯРНОЇ ДИФУЗІЇ ВОЛОГИ

І.І. Гапонюк

Національний університет харчових технологій

У статті виконано експериментальні дослідження з уточнення механізму внутрішньокапілярної дифузії вологи в капілярно-пористих тілах різного вологовмісту, визначено фактори впливу розмірів і висоти шару зневоджуваних тіл, способів підведення робочих газів та енергії робочих газів, отримано напівемпіричні рівняння впливу цих факторів на кінетику сушіння й вирівнювання внутрішньокапілярного опору дифузії вологи, технологічні коефіцієнти розрахунків режимів сушіння, теоретично доведено й експериментально пі-

дтверджено технологічну й енерговитратну доцільність спадних режимів сушіння, експериментально встановлено й теоретично обґрунтовано можливість використання робочих газів підвищеного вологовмісту для управління критерієм Кірпічова, доведено вплив аеродинамічного фактора на зростання енергії опору внутрішньокапілярної дифузії вологи в капілярно-пористих тілах за умов конвективного тепловологообміну, домінуючий вплив аеродинамічного опору на опір внутрішньокапілярної дифузії вологи, визначено фактори впливу та способи управління цим опором, обґрунтовано режими збільшення рушійного потенціалу міжфазового вологообміну за незмінної енергії робочих газів.

Ключові слова: сушіння, режими сушіння, теплота, вологість, сипкі капілярно-пористі тіла, капіляри, рушійний потенціал, теплообмін, масообмін, робочі гази, внутрішньокапілярний опір, дифузія вологи, рушійний потенціал, аеродинамічний опір.

Для доведення теоретично-обґрунтованої моделі внутрішньокапілярної дифузії вологи в капілярно-пористих колоїдних тілах за конвективних способів зневоднення малорухомого й рухомого шарів цих тіл в умовах наближених до виробничих та уточнення коефіцієнтів пропорційності в емпіричних залежностях опису тепловологокінетики сушіння були виконані експериментальні дослідження в лабораторних і виробничих умовах.

На стендових установках змінювали товщину шару зерна від 0,05 до 0,35 м, варіювали температуру робочих газів в діапазоні від 20 до 350 °С, а швидкість течії робочих газів — від 0,01 до 4,5 м/с. Відносну вологість робочих газів змінювали від 0,2 до 99 %, а вологовміст газів — від 6,2 до 44,5 г/кг.

Способи підведення робочих газів змінювали періодично («під розрідженням») і порівнювали із теплокінетичними показниками тепловологообміну для зміненого способу підведення газів «під тиском». Діапазон перемінного тиску (розрідження) змінювали для обох способів від 50 до 2300 Па, тобто до межового стану рухомості шару зерна від нерухомого в рухомий.

Методи розрахунку структурно-механічних параметрів предмета досліджень. Розміри тіл зернин встановлювали штангенциркулем або набором сит, відповідним дослідному зразку. Так, для зразка пшениці — три яруси сит із розміром отворів верхнього 2,7x20 мм, середнього — 2,2x20 мм та нижнього — 1,7x20 мм. Об'єм зернини та насінини визначали зануренням наважки зерна в мірну колбу з рідиною, що не викликає розбухання зерна (керосин).

Вологість шару зерна встановлювали експрес-аналізаторами, стандартним і зразковим методами.

Методи розрахунку коефіцієнта вологообміну для різних градієнтів температури (∇T) та значень температури зерна (Θ), інтенсивність випаровування вологи з поверхні зернини розраховували за формулою [1, 2, 3, 5]:

$$g_m = \beta \cdot \rho_o (u_{п.к.} - u_p), \quad (1)$$

де g_m — інтенсивність випаровування вологи з поверхні зернівки в оточуюче середовище, кг/(м²·год); β — коефіцієнт вологообміну, м/с; ρ_o — густина су-

хих речовин зернини, кг/м³; $u_{п.к}$ — вологовміст на поверхні зернини, що відповідає критичній точці, кг/кгс.р.; $u_{р}$ — рівноважний вологовміст, кг/кгс.р.

Для зерна різницю вологовмісту ($u_{п.к}$ — $u_{р}$) розраховували за формулою [1, 2, 3, 5, 6, 8]:

$$u_{п.к} - u_{р} = (p_{м} - p_{п}) \cdot \omega_{р} / (p_{п} \cdot \phi), \quad (2)$$

де $p_{м}$ — тиск насиченої пари при дійсній температурі термометра, Па; $p_{п}$ — тиск насиченої пари повітря, Па; $\omega_{р}$ — вологість зерна; ϕ — відносна вологість повітря, %.

Різницю ($p_{м}$ — $p_{п}$) знаходили за формулою Шпрунга [1, 3]:

$$p_{м} - p_{п} = 0,504 \cdot B \cdot (t_{с} - t_{м}) / 105, \quad (3)$$

де B — барометричний тиск, Па; $t_{с}$ — температура сухого термометра, °С; $t_{м}$ — дійсна температура мокрого термометра, °С.

Коефіцієнт вологообміну розраховували за формулою [3 — 5]:

$$\beta = \frac{N \cdot R \cdot p_{н} \cdot \phi}{100 \cdot (p_{м} - p_{п}) \cdot \omega_{р}}, \quad (4)$$

де N — швидкість сушіння, %/хв.; R — приведений радіус зернини, м (брали з таблиці або приймали $\text{декв} \approx 4 \cdot R_{с}$).

Відносну вологість повітря ϕ встановлювали за поточними показниками портативного вимірювача вологи й температури «ИВТМ-7 К» і звіряли з розрахунковими даними за співвідношенням $p_{п} / p_{н}$, або встановлювали по психометричній таблиці за показниками $t_{с}$ і $t_{м}$;

Швидкість сушіння розраховували за формулою [1, 3, 4]:

$$N = \frac{\omega_0 - \omega_K}{\tau_K}, \quad (5)$$

де ω_0 — вологість на початку сушіння, %; ω_K — критична вологість, %; τ_K — тривалість періоду сушіння від ω_0 до ω_K , хв.

За експериментальними даними будували графічні залежності:

– зміни вологовмісту зерна в часі від різниці температур середовищ і значень градієнта для різних величин вологовмісту зерна за умов незмінності

температури шару зерна $\frac{d\theta}{d\tau} = \text{const}$, %;

– динаміка швидкості сушіння шару зерна від різниці температур середовищ і значень градієнта, %/хв;

– динаміка нагрівання шару зерна від параметрів середовищ $\frac{d\theta}{d\tau}$, °С/хв.

Методи обчислень експериментальних даних. Число повторень дослідів відповідало критерію логічно-допустимих відхилень та достатності для встановлення залежності. Для уникнення впливу неврахованих випадковостей, досліди мінімізували в часі, тобто черговість їх реалізації встановлювали не порядком у плані досліджень, а за таблицями випадкових чисел, наведеними у працях [1—3, 5—8].

Після завершення виконання всіх дослідів плану експериментів здійснювали статистичну оцінку отриманих результатів, суть якої зводиться до виключення грубих помилок, розрахунків середніх значень спостережень \hat{y}_u , а також розрахунку відносної помилки та ряду інших статистичних характеристик.

Для чисельної оцінки коефіцієнтів в емпіричних залежностях застосовували метод найменших квадратів [3]. Для визначення коефіцієнтів b_i в емпіричній формулі:

$$\hat{y}_u = f(x_u, b_i), \quad i=1, 2, \dots, n, \quad u=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

розраховували середньоквадратичні відхилення S_{y2} . Умови найменших значень S_{y2} будуть відповідати найкращому наближенню \hat{y}_u дослідним даним:

$$S_{y2} = \frac{1}{N-1} \sum_{u=1}^N (\hat{y}_u - y_u)^2 \quad (7)$$

Якщо функція (7) диференційована, тоді необхідною умовою відміченого вище мінімуму відхилень:

$$S = \sum_{u=1}^N [\hat{y}_u - f(x_u, b_i)]^2 \rightarrow \min \quad (8)$$

буде дотримання рівності:

$$\frac{\partial S}{\partial b_1} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial b_2} = 0; \dots; \quad \frac{\partial S}{\partial b_n} = 0. \quad (9)$$

Розрахунки коефіцієнтів тепломасообміну і пропорційності в емпіричних залежностях кінетики нагрівання і сушіння зерна, інших математичних залежностей, отриманих при проведенні дослідження, розраховували за стандартною програмою і в окремих випадках зіставляли з отриманими базовими програмами Math-CAD.

Для рівнянь, отриманих за методом найменших квадратів, застосовували статистичний аналіз, заснований на оцінці дисперсій. Виконували оцінку значимості коефіцієнтів рівняння, а потім перевіряли адекватність цих рівнянь дослідним даним.

Значимість коефіцієнтів b_i перевіряли за критерієм Стюдента (t —критерію):

$$t = |b_i| / S_{b_i}, \quad (10)$$

де S_{b_i} — середньоквадратичне відхилення i -го коефіцієнта рівняння.

Перевірку відповідності здійснювали за критерієм Фішера, що являє собою відношення більшої дисперсії (розпилення даних) до меншої за виразом:

$$F = S_{2неад}^2 / S_{2\hat{y}_u}^2 \quad \text{або} \quad F = S_{2\hat{y}_u}^2 / S_{2неад}^2, \quad (11)$$

де $S_{2неад}^2$ — дисперсія невідповідності, що характеризує розпилення «розкид» розрахованих за рівнянням (11) значень \hat{y}_u та результатів відповідних дослідних даних y_u :

$S_{2\hat{y}_u}^2$ — дисперсія помилки досліду, що характеризує розпилення значень y_u в паралельних дослідах та середнього результату досліду \hat{y}_u .

Отримані розрахункові значення критерію Фішера із виразу (11) порівнювали з табличним значенням критичної величини Фішера $F_{кр}$. за умов, коли:

$$F < F_{кр}. \quad (12)$$

Перевірку відповідності не проводили за умов відповідності числа значимих коефіцієнтів у рівняннях числу дослідів.

Статистичну оцінку рівнянь регресії також виконували на персональному комп'ютері за базовими програмами математичного оброблення результатів.

В окремих випадках, для додаткової перевірки коефіцієнтів найбільш важливих залежностей, таких як кінетики сушіння ($\frac{dW}{d\tau} = f(t_1, \theta_0, W_0, v_0, d_0)$) та функції найменших витрат теплоти відпрацьованих робочих газів ($I_2 \cdot L_2 \rightarrow \min$) для найбільш відмінних за своїми властивостями зерновим культурам (кукурудза, ріпак), отримані емпіричні залежності додатково перевіряли методом накладення дійсних і розрахункових графічних залежностей. Для цього за допомогою програмного забезпечення ПК будували вказані графічні залежності та «накладали» на отримані дослідним шляхом і звіряли середні відхилення (Δ) середньоквадратичної дисперсії (S_{bi}).

На підставі експериментальних досліджень авторами наведено теплову оцінку опору випаровування на завершальному етапі зневоднення [3, 4, 7, 8]:

$$\Delta H_p = \Delta = \frac{q - r_{роз}}{r_{роз}}, \quad (13)$$

де $r_{роз}$ — розрахункове зниження прихованої теплоти пароутворення, яку визначають за формулою [2, 4, 5]:

$$r_{роз} = 2500 - (2,3 + 0,0014 \cdot \theta) \cdot \theta; \quad (14)$$

де θ — температура зерна, °С.

З урахуванням цього, витрати теплоти на випарювання вологи визначають за виразом [1, 3, 5, 7, 8]:

$$Q_1 = W \cdot (r + \Delta r), \quad (15)$$

де r — прихована теплота пароутворення, кДж/кг; Δr — теплота, що затрачена на подолання внутрішнього опору дифузії вологи, $\Delta r = (0,04 \dots 0,30) r$.

Принадібно слід зауважити, що на практиці для забезпечення вологообміну на завершальному етапі зневоднення зерна збільшують русійний потенціал підвищенням температури робочих газів [3, 6, 7]. За цих обставин у зерносушильних агрегатах вітчизняних конструкцій встановлено висхідні режими сушіння зерна, що, у свою чергу, спричиняє неоднорідне пошарове нагрівання зернини, втрати теплоти із відпрацьованими газами та невисоку ефективність використання їх вологопоглинаючого потенціалу через значне зменшення насиченості відпрацьованих газів.

Оскільки при зміні градієнтів температури не відбуваються зміни форм зв'язку вологи з матеріалом, то слід шукати інші пояснення зменшення енергії Δr . Сутність цього у виникненні внутрішньокапілярного розрідження за умов перевищення дифузії вологи над зустрічним потоком газів при швидкісному зневодненні капілярно-шпаруватих тіл. Нижче наведемо пояснення цього.

Як відомо, зерно за загальноприйнятою класифікацією відноситься до колоїдних капілярно-шпаруватих тіл. Вважається, що капіляри зерна за своїми розмірами відносяться до мікрокапілярів, тобто їх радіус становить близько $1,2 \cdot 10^{-7}$ м і тому вони здатні поглинати вологу з повітря. Розвинена система мікрокапілярів із значним перевищенням їх довжини L над діаметром \varnothing ($L \gg \varnothing$) обумовлює значний об'ємний вміст порожнин в тілі зернини (для зерна окремих культур до 20...35% об'єму зернини [3]), велику активну поверхню капілярів (для зерна пшениці $S \approx 200 \dots 250 \text{ м}^2/\text{г}$ [3]) та можливість поглинати до 30...45% вологи. Більша частка фізико-механічної вологи перебуває в капілярах, які мають контакт із поверхнею зернини, тому в процесі зневоднення зерна волога під дією рушійних потенціалів переміщується з внутрішньої частини капілярів на поверхню зернини, внаслідок чого у вивільнених порожнинах капілярів може створюватися розрідження $-\Delta H$. Очевидно, що за умов сполученості пор зневоджуваного тіла, внутрішньопорове розрідження рівномірно розподіляється і залежить від способу зневоднення, швидкості вивільнення пор від вологи та розмірів тіла.

На підставі теоретично-обґрунтованої моделі внутрішньої дифузії вологи капілярно-шпаруватих тіл й аналізу результатів експериментальних досліджень нами було отримано підтвердження теплоаеродинамічного механізму дифузії вологи зерна та встановлено чисельну залежність величини коефіцієнта масообміну від капілярно аеродинамічного опору для зерна кукурудзи. Графічно цю залежність, через співвідношення частки поглинутих газів зерном від швидкості його зневоднення (температури робочих газів), представлено на рис.1 і 2. Тривалість процесу вирівнювання внутрішньо-капілярного тиску (поглинання капілярами газів) зернини різної вологості та швидкості зневоднення (температури робочих газів) — на рис.3, а вплив вмісту защемлених газів на внутрішню дифузію вологи — на рис.4.

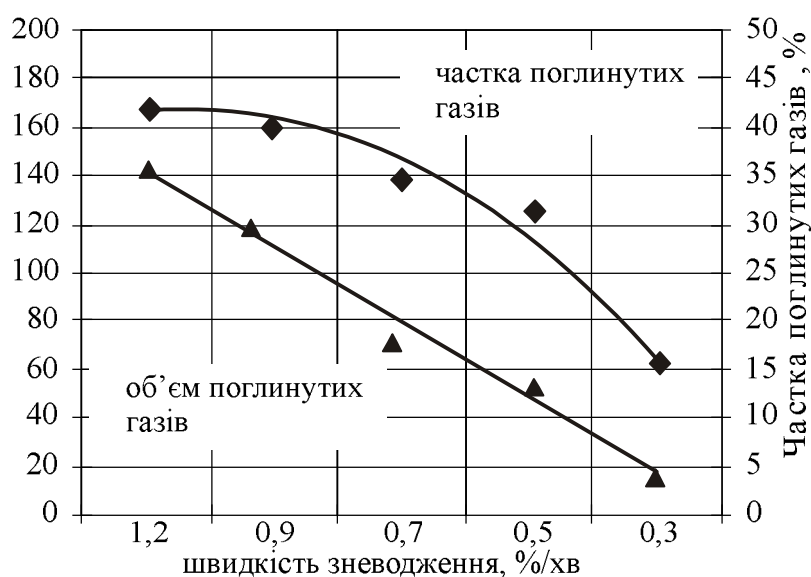


Рис. 1. Залежність поглинання зерном газів від швидкості його зневоднення

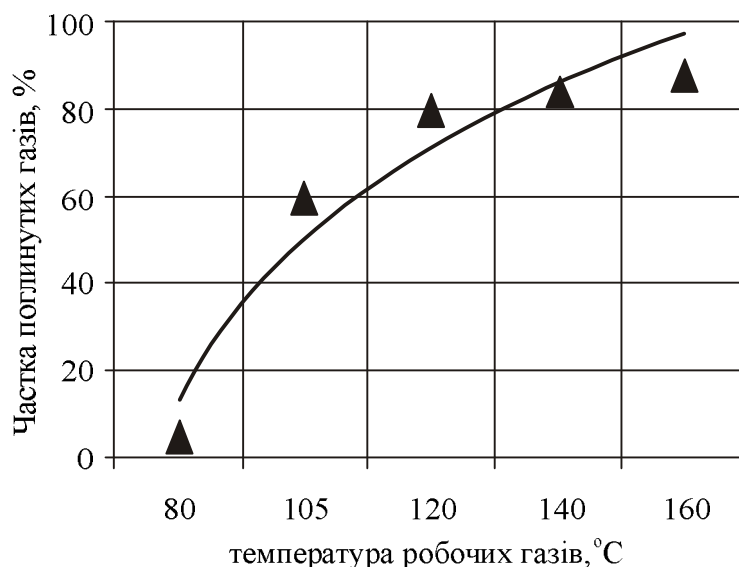


Рис. 2. Залежність частки поглинутих зерном газів від температури агенту сушіння, ($W=39\%$, $v=0,14\text{м/с}$)

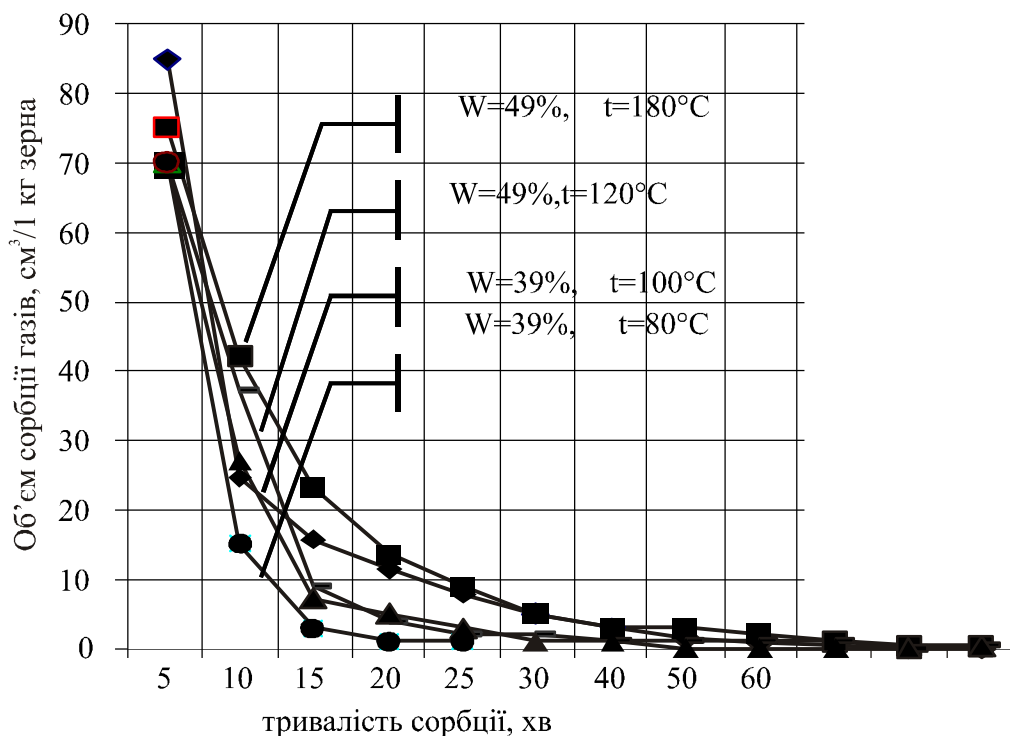


Рис. 3. Динаміка сорбції зерном газів

Експериментальними дослідженнями було підтверджено зв'язок внутрішнього опору дифузії вологи Δr із ΔH_p і встановлено залежність капілярного аеродинамічного опору від стану його вологості W , найменшого розміру тіла зернини l (товщини), швидкості зневоднення $dW/d\tau$ та наявності защемлених газів:

$$\Delta H_p = (a/W) \cdot (l/c) \cdot \left(\frac{dW}{d\tau} \right)^b, \quad (16)$$

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

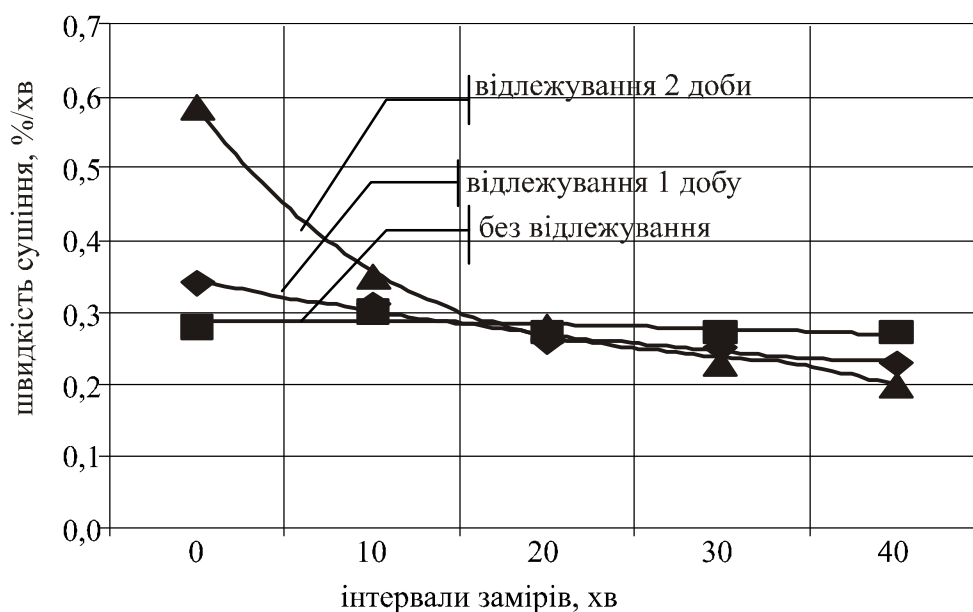


Рис. 4. Вплив тривалості відлежування зерна кукурудзи (вміст защемлених газів) на швидкість сушіння ($W=24,3\%$)

Очевидно, що рівняння потоку течії доцільно представляти з правкою на величину капілярно аеродинамічного опору, як і інші рівняння дифузії вологи в капілярно-шпаруватих тілах:

$$\vec{j} = -(a_m \cdot \rho_0 \cdot \nabla U + a_m^T \cdot \rho_0 \nabla T + a_p \cdot \nabla p - b \Delta H). \quad (17)$$

З виразу (18) очевидно, що величина капілярно-аеродинамічного опору пов'язана з розмірами капілярів, тому для якісної характеристики $K_{КАО}$ доцільно ввести критерій масообміну $K_{КАО}$, який виразимо через співвідношення площі поверхні контакту масообміну S до відстані l від поверхні контакту до найбільш віддаленої точки тіла зернини в напрямі градієнта вологовмісту (∇W):

$$K_{КАО} = S/l, \quad (18)$$

де S — площа поверхні контакту масообміну, m^2 ; l — відстань від поверхні контакту до найбільш віддаленої точки тіла зернини в напрямі градієнта вологовмісту.

Критерій $K_{КАО}$ характеризує енергоємність дифузії вологи та інерційність масообміну.

Оскільки площа S залежить від способу масообміну (конвективний, кондуктивний) та стану рухомості шару зерна (нерухомий, зважений або проміжний), а відстань l — від розміру і форми зернини, а також площі контакту S , то із збільшенням швидкості руху шару зерна та для конвективного способу масообміну величина $K_{КАО}$ буде меншою і, відповідно, меншою буде інерційність масообміну й додатковий опір внутрішньої дифузії вологи Δr .

Для умов зневоднення малорухомого шару зерна в шахтній прямотечійній зерносушарці (критерій $K_{КАО}$) площа S може становити 20...60% від площі поверхні зернини $S = (0,2 \dots 0,6) \cdot F_3$ і за однакових умов масообміну залежить

від форми зернини. Виразивши площу зернини через її лінійні розміри, отримаємо вираз:

$$K_{KAO} = S/l = 0,3 \cdot [4\pi R(l_s + 3R)]/l. \quad (19)$$

Підставивши чисельні значення розмірів зерна кукурудзи, пшениці та ріпаку, отримаємо показник K_{KAO} для цих культур:

а) зерна кукурудзи — $K_{KAO}^K \approx 7,5$;

б) зерна пшениці — $K_{KAO}^{Pu} \approx 3,3$;

в) насіння ріпаку — $K_{KAO}^P \approx 1,8$.

Отже, найбільша інерційність та опір внутрішньої дифузії вологи при конвективному способі зневоднення у зерна кукурудзи, найменша — ріпаку. З огляду на теплоаеродинамічну модель дифузії вологи для зменшення додаткового опору внутрішньої дифузії вологи на завершальних етапах зневоднення крупнодисперсного зерна доцільно встановлювати меншу швидкість сушіння, ніж для дрібнодисперсних, і застосовувати короткотривалий (імпульсний) режим (до 5...15 хв), змінений спосіб підведення газів із подальшим застосуванням методу повільного охолодження й остаточного зневоднення зерна ($\Delta W = 1,5 \dots 3,5\%$) з використанням систем активного вентилявання в нерухому шарі зерна.

Найбільш інтенсивно процеси сорбції газів відбуваються протягом перших 5...15 хв, при цьому також виділяється найбільша частка газів (рис.3). Залежність сорбції газів від температури робочих газів і швидкості зневоднення зерна можна описати емпіричними залежностями, зокрема для зерна кукурудзи:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = 2,8 \cdot \theta_0^{0,72}; \quad (20)$$

$$V_z = -31 \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial \tau}\right) + 173; \quad (21)$$

$$\delta_z = 52 \cdot \ln(t_1) + 13,6; \quad (22)$$

$$\delta_z = -1,8 \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial \tau}\right)^2 + 4,6 \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial \tau}\right) + 38,7, \quad (23)$$

де V_z — об'єм поглинутих капілярами та порожнинами зернини газів, $\text{см}^3/\text{кг}$ зерна; δ_z — частка поглинутих зерном газів до загального об'єму вилученої із зернини вологи, %; θ — температура зерна, $^{\circ}\text{C}$; t_1 — температура робочих газів, $^{\circ}\text{C}$.

На підставі експериментальних даних для періоду незмінної швидкості зневоднення зерна отримано математичне описання залежності капілярного аеродинамічного опору від початкового вологовмісту зерна та швидкості дифузії вологи:

$$\Delta E = \left(\frac{\Delta V_{BK} \cdot \rho_B}{F_K} \right) \cdot \left(1 - \frac{dW}{dW_\phi} \right) - \left[V_{TK} \cdot \left(1 + \frac{\Delta T}{T} \right)^K \right], \quad (24)$$

де V_z — об'єм поглинутих капілярами та порожнинами зернини газів, $\text{см}^3/\text{кг}$ зерна; δ_z — частка поглинутих зерном газів до загального об'єму вилученої із зернини вологи, %; θ — температура зерна, $^{\circ}\text{C}$; t_1 — температура робочих газів, $^{\circ}\text{C}$.

Вплив защемлених газів на внутрішню дифузію вологи підтверджено в дослідних умовах шляхом збільшення частки цих газів у капілярах зернини (рис. 4).

Зі збільшенням частки «защемлених» (внутрішньокапілярних) газів $V_{кзг}$ енергія капілярного аеродинамічного опору зменшується і, за певних обставин, може набувати від'ємних значень та сприяти дифузії вологи. Це може спостерігатись при перевищенні внутрішньокапілярного тиску пари зернини над тиском пари на поверхні зернини. Такий стан спостерігається при інтенсивному диханні зерна, об'ємному підведенні теплоти тощо. У першому випадку частка «защемлених газів» $V_{кзг}$ значно зростає. Для обох груп дослідів зразків зерна вологістю 24,3% та 39% вже на 2-гу добу попереднього його відлежування встановлено зростання інтенсивності вологообміну на 15 та 40% відповідно (рис.4) порівняно з контрольними зразками зерна. Для контрольного та дослідних зразків зерна кукурудзи, із збільшеним вмістом защемлених газів, початковою вологістю $W_0=39\%$ кінетику зневоднення можна представити в такому вигляді:

а) для контрольного зразка зерна:

$$\left(\frac{\partial W}{\partial \tau}\right) = -0,001 \cdot \tau^2 + 0,002 \cdot \tau + 0,29; \quad (25)$$

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau}\right) = 0,213 \cdot \tau^2 - 1,94 \cdot \tau + 5,14; \quad (26)$$

б) дослідного з підвищеним вмістом защемлених газів (1 доба):

$$\left(\frac{\partial W}{\partial \tau}\right) = 0,0043 \cdot \tau^2 - 0,0537 \cdot \tau + 0,392; \quad (27)$$

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau}\right) = 0,8 \cdot \tau^2 - 6,56 \cdot \tau + 13,36; \quad (28)$$

в) дослідного з підвищеним вмістом защемлених газів (2 доби):

$$\left(\frac{\partial W}{\partial \tau}\right) = 0,031 \cdot \tau^2 - 0,27 \cdot \tau + 0,81; \quad (29)$$

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau}\right) = 0,75 \cdot \tau^2 - 6,29 \cdot \tau + 12,99. \quad (30)$$

Отримані емпіричні залежності швидкості зневоднення та нагрівання зерна кукурудзи з різним вмістом защемлених газів при конвективному способі тепломасообміну при способі підведення газів «під розрідженням» свідчить про безпосередній вплив защемлених газів на внутрішню дифузію вологи та несуттєвий вплив на швидкість нагрівання тіла зернини, що очевидно з незначного змінення питомої маси дослідних і контрольних зразків зерна.

Висновки

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

2. Фізичну сутність Δr можна пояснити створюваним розрідженням у капілярах зернини ΔH та втратами енергії при проникненні (фільтрації) газів K_f . Для подолання аеродинамічного опору капілярів ΔH збільшують рушійний потенціал робочих газів.

3. Вмістом защемлених газів у капілярах зернини можна управляти дифузійною вологою та витратами енергії зневоднення.

4. Для зневоднення зерна, особливо з підвищеним вологовмістом і більшими розмірами зернин, доцільно встановлювати спадні режими сушіння замість висхідних.

5. Додатково збільшити рушійний потенціал зневоднення зерна на 15...20 % можна створенням розрідження в сушильних зонах змінням способу підведення робочих газів із «під нагнітанням» на «під всмоктуванням».

6. На завершальному етапі зневоднення зерна зменшити втрати теплоти із відпрацьованими газами та покращити пошарову однорідність вологообміну зернини можна короткочасним ($\tau = 5...15$ хв) змінням градієнта рушійних потенціалів ∇P і ∇T (короткочасним припиненням підведення робочих газів).

7. Для зменшення втрат теплоти із відпрацьованими газами останніх сушильних зон і підвищення коефіцієнта внутрішньої дифузії вологи можна використовувати ці гази для нагрівання надміру зволоженого зерна. На цьому етапі критерій Косовича набуває менших значень і процеси сорбції зерном вологи можуть не відбуватись.

Література

1. *Флауменбаум Б.Л.* Основы консервирования пищевых продуктов / Б.Л. Флауменбаум, С.С. Танчев, М.А. Гришин. — М.: Агропромиздат., — 1986. — 494 с.

2. *Лыков А.В.* Тепломассообмен (Справочник). — М.: Энергия. 1972. — 560 с.

3. *Остапчук Н.В.* Повышение эффективности сушки зерна. / Н.В. Остапчук, А.Б. Шашкин, В.Д. Каминский. — Киев: Техника, 1988. — 180 с.

4. *Гапонюк І.І.* Удосконалення технології сушіння зерна. — Одеса.: Поліграф, 2009. — 182 с.

5. *Егоров Г.А.* Влияние тепла и влаги на процессы переработки и хранения зерна. — М.: Колос, 1973. — 264 с.

6. *Малин Н.И.* Энергосберегающая сушка зерна. — М.: КолоСС, 2004. — 240 с.

7. *Гапонюк І.І.* Вплив параметрів довілля на сушіння зерна // *Ukrainian Food Journal*. — К., 2013. — Volume 2, Issue 3. — С. 337—346.

8. *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.

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УТОЧНЕННОЙ МОДЕЛИ ВНУТРИКАПИЛЛЯРНОЙ ДИФУЗИИ ВЛАГИ

И.И. Гапонюк

Национальный университет пищевых технологий

В статье выполнены экспериментальные исследования по уточнению механизма внутрикапиллярной диффузии влаги в капиллярно-пористых телах различного влагосодержания, установлены факторы влияния размеров и высоты слоя обезвоживаемых тел, способов подведения рабочих газов и энергии рабочих газов, получены полуэмпирические уравнения влияния этих факторов на кинетику сушения и выравнивания внутрикапиллярного сопротивления

диффузии влаги, получены технологические коэффициенты расчетов режимов сушения, теоретически доказано и экспериментально подтверждена технологическая и энергорасходная целесообразность нисходящих режимов сушения, экспериментально установлено и теоретически обоснованно возможность использования рабочих газов повышенного влагосодержания для управления критерием Кирпичева, доказано влияние аэродинамического фактора на рост энергии сопротивления внутрикапиллярной диффузии влаги в капиллярно-пористых телах при условиях конвективного тепловлагообмена, установлено доминирующее влияние аэродинамического сопротивления на сопротивление внутренне капиллярной диффузии влаги, факторы влияния и способы управления этим сопротивлением, обоснованно режимы увеличения движущего потенциала межфазового влагообмена при неизменной энергии рабочих газов.

Ключевые слова: сыпучие капиллярно пористые тела, влага, капилляры, движущий потенциал, теплота, тепломассообмен, рабочие газы, внутренне капиллярное сопротивление, диффузия влаги, движущий потенциал, аэродинамическое сопротивление.