

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 $\nabla P_{кат}$ 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, газ, нагрівання.

За виконаними дослідженнями тепломасообмінних процесів шахтних прямотечійних зерносушарок у виробничих умовах при різних вхідних параметрах робочих газів (t_1, d_1, v_1) та режимів зневоднення встановлено параметри відпрацьованих газів по сушильних та охолоджувальній зонах сушарки (t_2, d_2, v_2) та виконано порівняння цих значень із розрахунковими даними [1, 6]. Якщо невисокий вологовміст відпрацьованих газів після зони охолодження ($d_2 < 15 \text{ г/м}^3$) дозволяє використовувати теплоту цих газів для подальшого їх повторного використання без значного порушення балансу вологи зерносушильного агрегату, то підвищений вологовміст відпрацьованих газів після сушильних зон ускладнює їх повторне використання та ставить під сумнів економічну доцільність рекуперації теплоти цих газів без їх зневоднення [1, 5, 6] або використання в складних теплоутилізуючих пристроях.

У ряді відомих публікацій наведено розрахунок вологоємнісного балансу робочих газів за умов повернення відпрацьованих робочих газів у сушильні зони або топкове відділення [1, 4, 5]. За цими розрахунками, починаючи із третього – четвертого циклу повернення робочих газів у зерносушильний агрегат, а для роботи сушарки в осінньо-зимовий період вже із другого, погіршується паспортний режим вологообміну, що спричиняє зменшення продуктивності сушильного агрегату [1, 6]. Тому використовувати теплоту відпрацьованих робочих газів із підвищеним вологовмістом ($d_2 > 20 - 25 \text{ г/м}^3$) поверненням їх у зерносушильний агрегат без спеціальної підробки (зневоднення) недоцільно.

Зважаючи на степеневу залежність швидкості зневоднення зерна (dW/dt) від його температури ($d\theta$), нами було виконано дослідження тепловологообміну вологого зерна із відпрацьованими газами.

При конвективному тепловологообміні вологого зерна (θ_0, W_0) із відпрацьованими робочими газами (t_2, d_2) його вологість може збільшуватись або залишатись незмінною. За умов незначної різниці температур фазових середовищ волога переміщується під дією градієнта рівноважного вологовмісту та зерна [2–4].

За умов значної різниці температур фазових середовищ та незначної відмінності вологовмісту цих середовищ ($\delta t = (t_2 - \theta_0) \gg 0$, $\delta W = (W_0 - W_{\text{рівн}}) \leq 0$), при зустрічних градієнтах теплоти та вологи, домінуючу роль у дифузії вологи відіграють енергетичні стани цієї вологи у поверхневих шарах [6], і зі збільшенням парціального тиску пари капілярів периферійних шарів зернини, зерно може не зволожуватися.

Для встановлення кінетики тепло- і вологообміну міжфазових середовищ газами підвищеного вологовмісту параметрами, близькими до відпрацьованих робочих газів зерносушильного агрегату, було виконано експериментальні дослідження за методикою досліджень і науковцями НУХТ (м. Київ) спільно з науковцями ОНАХТ на стендовій установці ОНАХТ (м. Одеса). При виконанні досліджень неперервно контролювали перемінні показники: параметри довкілля – температуру t_0 (°C), відносну вологість φ_0 (%) та вологовміст d_0 (г/кг); параметри робочих газів у вхідному та вихідному перетині шару зерна – температуру t_2 і t_3 (°C), вологовміст d_2 і d_3 (г/кг) та швидкість течії v_2 і v_3 (м/с); поточну температуру зерна θ_i і W_i (%).

Кінетику тепловологообміну встановлювали для зразків зерна жита об'ємної ваги 785 г/л, із вмістом смітної домішки до 2 % та зернової – до 5 %. На весь період виконання досліджень вологовміст та температура газів довкілля змінювалися в межах 5 % від початкової: $t_0 = 22 \text{ °C}$ та $d_0 = 10,5 \text{ г/м}^3$.

Параметри робочих газів для досліджень встановлювали близько граничних значень їх вологопоглинальної спроможності ($\varphi_0 \approx 100 \%$), температуру змінювали в діапазоні перевищення температури шару зерна $10 \dots 30 \text{ °C}$ $\{(t_0 - \theta_0) = 10 \dots 30 \text{ °C}\}$. Зазначені вихідні умови відповідають найгіршим умовам роботи шахтних прямотечійних зерносушарок вітчизняних та закордонних виробників.

За змінних параметрів робочих газів (t_2, d_2) швидкість нагрівання зерна жита коливалась у діапазоні $d\theta/dt = 4,8 - 6,9 \text{ (°C/хв)}$. Більші значення швидкості нагрівання зерна відповідають умовам більшої різниці температури фазових середовищ та швидкості течії газів.

Порівнюючи наведені дані із кінетикою нагрівання малорухомого шару зерна за традиційних умов тепловологообміну в шахтах зерносушарок та режимів його сушіння, можна відзначити перевищення швидкості нагрівання тіла зернин в $10 \dots 15$ разів! Порівнюючи ж наведені дані експериментальних досліджень із аналогічними дослідженнями нагрівання малорухомого шару зерна жита тієї самої товщини шару $0,25 \text{ м}$, також можемо відзначити подібність отриманих результатів обох кінетик нагрівання різних зернових культур. За умов міжфазового тепломасообміну температура робочих газів понижувалася, а шару зерна – відповідно підвищувалася згідно з тепловим балансом теплоти взаємодіючих фазових середовищ.

Оскільки в наведених дослідженнях вологість газів встановлювали близьку до граничних значень ($\varphi_0 \approx 100 \%$), тому із їх охолодженням частка вологи цих газів, у вигляді конденсату, потрапляла на поверхню шару зерна та зволожувала його на величину цього конденсату віднесеного до маси зерна $\delta W_{\text{конд}}$.

Розрахункове значення вологості зерна (W_p) встановлювали за масою конденсату через добуток зменшення вологовмісту на кількість газів, що пронизували шар зерна. Величину конденсату встановлювали

розрахунковим способом за добутком різниці вологовмісту газів при їх температурі до шару зерна t_2 (d_i) та середнього шару зерна θ_i на часові витрати газів L ($\text{м}^3/\text{хв}$):

$$M_{\text{конд}} = (d_i - d_0) \cdot L, \quad (1)$$

За умов перевищення рівноважної вологості та температури газів над відповідними параметрами зерна ($W_p > W_0$, $t_2 > \theta_i$) кінцева вологість зерна W_2 може зрости на величину сорбованої води із насичених вологою газів $\delta W_{\text{сорб}}$ та конденсату на поверхні зерна $\delta W_{\text{конденс}}$ ($W_2 = \delta W_{\text{сорб}} + \delta W_{\text{конденс}}$). За показниками вологовмісту газів (d_i), температури зерна (θ) та шкали рівноважної вологості [1, 4] можна встановити градієнт вологи. Майже на всьому проміжку зростання температури зерна θ_i ($6^\circ\text{C} < \theta < 28^\circ\text{C}$) рівноважна вологість перевищувала вологість зерна. Проте, як видно із результатів досліджень, фактична вологість зерна була меншою від розрахункової на величину $\delta W_{\text{сорб}}$ та частки $\delta W_{\text{конденс}}$.

Із збільшенням швидкості течії робочих газів кінцева вологість зерна порівняно із розрахунковими значеннями зменшувалася.

На рис. 1 і 2 представлено відповідно динаміку вологи та температури зерна жита при міжфазовій взаємодії із теплішими газами підвищеної вологості ($\varphi_2 \approx 100\%$ та $d_2 = 20 - 21 \text{ г/м}^3$, $t_2 = 26 - 28^\circ\text{C}$).

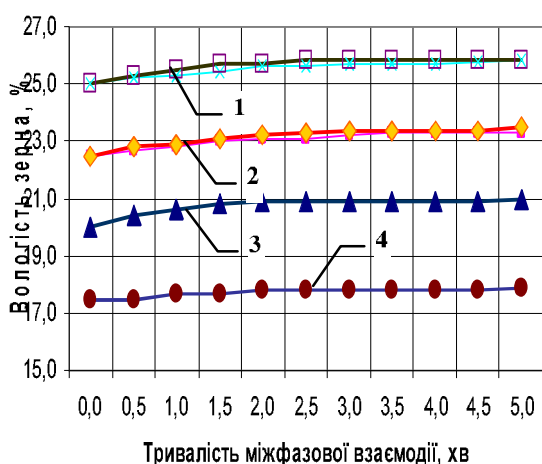


Рис. 1 – Динаміка вологи зерна різної температури при міжфазовій взаємодії: 1 – $\theta = 6^\circ\text{C}$; 2 – $\theta = 11^\circ\text{C}$; 3 – $\theta = 11^\circ\text{C}$; 4 – $\theta = 11^\circ\text{C}$; 5 – $\theta = 15^\circ\text{C}$

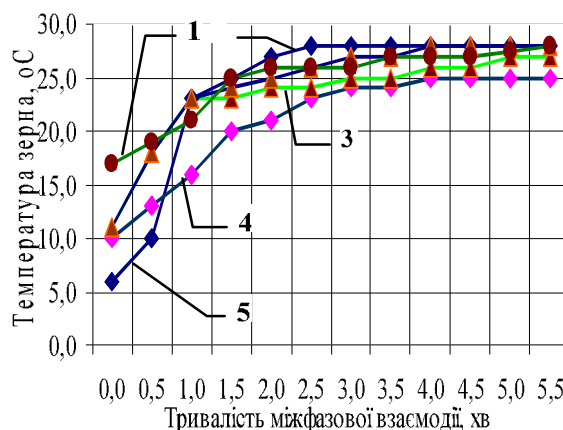


Рис. 2 – Динаміка температури зерна різної вологості: 1 – $W = 17,5\%$; 2 – $W = 25\%$; 3 – $W = 25\%$; 4 – $W = 22,5\%$; 5 – $W = 20\%$.

Із представлених на рис. 3 динаміки розрахункової (а) та фактичної (б) вологості зерна жита при міжфазовій взаємодії із спеціально підготовленими газами ($t = 26 - 28^\circ\text{C}$, $\varphi \approx 100\%$, $d = 20 - 21 \text{ г/м}^3$) видно, що за дослідними даними зерно жита зволожується менше від розрахункового на 2 – 6%, а із підвищенням швидкості течії газів в 2,5 разу фактична вологість зменшується ще суттєвіше – на (11 – 14)% від розрахункової, тобто лише на (0,3...0,5) %.

Оскільки остаточною оцінкою доцільності заходу із модернізації технології (процесу) є економічна доцільність [5], тому нижче наведемо аналіз витрат енергії при міжфазовій взаємодії зерна з газами для умов, наближених до виробничих. Найбільш характерними параметрами відпрацьованих газів є температура $t_2 \leq 50^\circ\text{C}$, вологість $\varphi_2 \approx 50\%$ [1,6].

Для розрахунків температуру відпрацьованих газів після сушильних камер приймемо із врахуванням втрат теплоти відпрацьованих газів при підведенні їх шару зерна, тобто меншою на $15 - 20^\circ\text{C}$: $t_2 = 26 - 28^\circ\text{C}$. Відносну вологість відпрацьованих газів φ_2 , з урахуванням найінтенсивнішого вологообміну та зменшення їх температури при транспортуванні, приймемо $\varphi_2 \approx 100\%$, із відповідним вологовмістом $d_2 = 20 - 21 \text{ г/м}^3$.

Температура зерна жита впродовж доби може змінюватися в широкому діапазоні $\theta_0 = 5 - 20^\circ\text{C}$, а вологість $W_0 = 15 - 30\%$.

При міжфазовій взаємодії зерно можна нагріти до температури газів $\theta_1 = 26 - 28^\circ\text{C}$ і одночасно із цим воно може додатково зволожитися на $\delta W = 0,5 - 1,5\%$, за паспортних параметрів течії робочих газів, і на $0,1...0,3\%$, за нашими рекомендаціями.

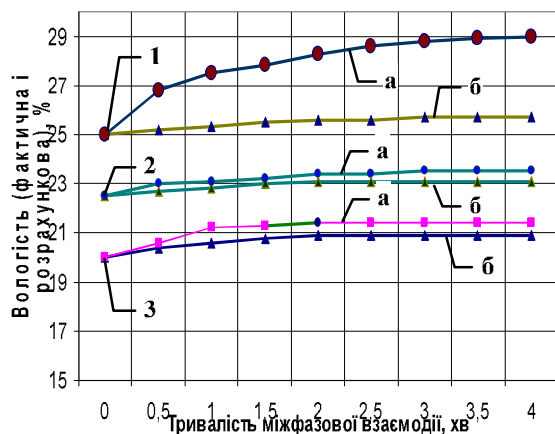


Рис. 3 – Динаміка а) розрахункової та б) фактичної вологості зерна: 1 – $\theta = 6^\circ\text{C}$, $W = 20\%$; 2 – $\theta = 10^\circ\text{C}$, $W = 22.5\%$; 3 – $\theta = 11^\circ\text{C}$, $W = 25\%$.

Для нагрівання зерна до температури відпрацьованих газів необхідно витратити теплоту $Q_{\delta\theta}$, яку можна розрахувати за відомою формулою [1, 3–5]:

$$Q_{\delta\theta} = G \cdot c_0 \cdot (\theta_1 - \theta_0), \quad (2)$$

де G – маса зерна, кг;
 c_0 – питома теплоємність зерна при вологості W_0 , кДж/(кг·К);
 θ_0 і θ_1 – кінцева та початкова температура зерна, $^\circ\text{C}$.

Витрати теплоти на висушування додаткової вологи зерна, що може зволожитися при вологообміні із відпрацьованими газами під час його нагрівання можна розрахувати за загальноживаною формулою [1, 3, 4]:

$$Q_{\delta W} = \delta W \cdot (r + \Delta r), \quad (3)$$

де r – схована теплота пароутворення при тем-

пературі зерна θ_1 , кДж/кг_{вол.};

Δr – питома теплота на подолання внутрішнього опору дифузії вологи, кДж/кг_{вол.};

δW – величина висушування вологи із зерна, кг.

В останніх колонках табл. 1 наведено розрахункові дані витрат теплоти на нагрівання та сушіння зерна жита в умовах міжфазової взаємодії.

Із наведених розрахунків видно, що за певних значень швидкості робочих газів та стану рухомості шару зерна, навіть за найгірших умов використання надміру зволжених газів невисокої температури, температура шару зерна зрівнюється із температурою робочих газів впродовж 5 – 8 хв, витрати теплоти нагрівання зерна $Q_{\delta\theta}$ є більшими від теплоти сушіння $Q_{\delta W}$ для зерна жита на $\delta Q = Q_{\delta\theta} - Q_{\delta W} = 22 - 50$ (кДж/кг_{зерна}). Із підвищенням вологовмісту зерна та зростанням температури і швидкості течії відпрацьованих газів економія теплоти δQ буде збільшуватися.

Висновки

1. При міжфазовій взаємодії газів підвищеної волого- та теплоємності можна керувати градієнтом вологоємності, швидкістю течії робочих газів та станом рухомості шару зерна.

2. За умов міжфазового теплообміну газами граничного вологовмісту може спостерігатися збільшення вологості шару зерна лише за рахунок частки конденсату на поверхні шару зерна.

3. Теоретично обґрунтовано та підтверджено дослідним шляхом параметри міжфазової взаємодії шару зерна із відпрацьованими робочими газами за яких відбувається мінімальний волого- та максимальний теплообмін.

4. Доведено економічну доцільність міжфазового теплообміну шару зерна із відпрацьованими робочими газами зерносушильних агрегатів.

5. Теоретично обґрунтовано та наведено вдосконалений пристрій попереднього підігрівання зернової суміші для збільшення експозиції теплообміну, зменшення тривалості контакту зерна з металевою поверхнею й більш рівномірного розподілу зерна в січєнні сушильної камери.

Література

- Гапонюк О.І. Активне вентильовання та сушіння зерна. / навчальний посібник / О.І Гапонюк, М.В. Остапчук, Г.М. Станкевич, І.І. Гапонюк. – Одеса: Поліграф, 2014. – 324 с.
- Лыков А.В. Тепломасообмен. // справочник. – М.: Энергия, 1972. – 560 с.
- Малин Н.И. Энергосберегающая сушка зерна. – М.: Колос, 2004. – 240 с.
- Станкевич Г.М. Сушіння зерна: [Підручник] / Г.М. Станкевич, Т.В. Страхова, В.І. Атаназевич. – К: Либідь, 1997. – 352 с.
- Остапчук М.В. Наукові основи процесів зберігання зерна // Наукові праці ОНАХТ, вип. 29. – Т.2. – С. 58–62.
- Гапонюк І.І. Удосконалення технології сушіння зерна. [Монографія]. – Одеса: Поліграф, 2009. – 182 с.