

## УПРАЛІННЯ ШВИДКІСТЮ НАГРІВАННЯ ШАРУ ЗЕРНА

В ряді відомих публікацій наведено розрахунок вологоємнісного балансу робочих газів за умов повернення відпрацьованих робочих газів в сушильні зони або топкове відділення [2, 3, 4, 7]. За цими розрахунками починаючи вже з третього – четвертого циклу повернення робочих газів в зерносушильний агрегат, а для роботи сушарки осінньо – зимовий період вже із другого, погіршується паспортний режим вологообміну, що спричиняє зменшення продуктивності сушильного агрегату [2, 4, 7]. Тому використовувати теплоту відпрацьованих робочих газів із підвищеним вологовмістом ( $d_2 > 20 - 25 \text{ г/м}^3$ ) поверненням їх в зерносушильний агрегат без спеціальної підробки (зневоднення) недоцільно.

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

За умов значної різниці температур фазових середовищ та незначної відмінності вологовмісту цих середовищ ( $\delta t = (t_2 - \theta_0) \gg 0$ ,  $\delta W = (W_0 - W_{\text{пен}}) \leq 0$ ), при зустрічних градієнтах теплоти та вологи, домінуючу роль на дифузію вологи відіграють енергетичні стани цієї вологи поверхневих шарах [2, 5, 6], і зі збільшенням парціального тиску пари капілярів периферійних шарів зернини, зерно може не зволожуватися.

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 змінювались в межах 5% від початкової:  $t_0 = 22 \text{ }^\circ\text{C}$  та  $d_0 = 10,5 \text{ г/м}^3$ .

Параметри робочих газів для досліджень встановлювали близько граничних значень їх волого поглинаючої спроможності ( $\varphi_0 \approx 100 \%$ ), температуру змінювали в діапазоні перевищення температури шару зерна  $10 \dots 30 \text{ }^\circ\text{C}$   $\{(t_0 - \theta_0) = 10 \dots 30 \text{ }^\circ\text{C}\}$ . 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 в діапазоні  $d\theta/dt = 4,8 - 6,9 \text{ (}^\circ\text{C/хв.)}$ . 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 відмітити 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 ж товщини шару  $0,25 \text{ м}$  також можемо відмітити подібність отриманих результатів обох кінетик нагрівання різних зернових культур. За умов міжфазового тепло-масообміну, температура робочих газів понижувалася, а шару зерна – відповідно підвищувалася згідно теплового балансу теплоти взаємодіючих фазових середовищ.

Оскільки в наведених дослідженнях вологість газів встановлювали близьку до граничних значень ( $\varphi_0 \approx 98 \%$ ), 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 по масі 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  $\theta_i$  на часові витрати газів  $L$  ( $\text{м}^3/\text{хв}$ ):

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

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 вологи із насичених вологою газів  $\delta W_{\text{сорб}}$  та конденсату на поверхні зерна  $\delta W_{\text{конд}} (W_2 = \delta W_{\text{сорб}} + \delta W_{\text{конд}})$ . По показникам вологовмісту газів ( $d_i$ ), температури зерна ( $\theta$ ) та шкали рівноважної вологості [1, 4] можна

встановити градієнт вологи. Майже на всьому проміжку зростання температури зерна  $\theta_i$  ( $6^\circ\text{C} < \theta < 28^\circ\text{C}$ ) 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  $\delta W_{\text{конд}}.$

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

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

Із представлених на рис.1 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 разів 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 [2], тому нижче наведемо аналіз витрат енергії при міжфазовій взаємодії зерна з та 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, 4, 6, 7].

За виконаними розрахунками вказаного способу нагрівання зерна пшениці відносної вологості  $W_0 = 17,5 - 20\%$  і температури  $\theta_0 = 16 - 17^\circ\text{C}$  робочими газами з вологовмістом  $d_2 = 20,5 - 22,5 \text{ г/м}^3$  і температурою  $t_2 = 28^\circ\text{C}$ , економія теплоти становить:

$$\delta Q = Q_{\delta\theta} - Q_{\delta W} = 13 \dots 20 \text{ (кДж/кг}_{\text{зерна}}).$$

В перерахунку на природний газ, що використовують вітчизняні зернозаготівельні підприємства, для однієї тони зерна економія теплоти становить  $0,45 \dots 0,66 \text{ м}^3/\text{т}$ .

Крім цього, десятикратне зростання швидкості нагрівання вологого шару зерна перед його зневодненням не лише прискорить внутрішню капілярну дифузію вологи й вирівняє пошарову в тілі зернини неоднорідність вологовмісту, а й зменшить ризик пошарового в зернині перегрівання термолабільних складових.

Очевидно, що з підвищенням вологості зерна ( $W_0$ ), зростанням температури відпрацьованих газів ( $t_2$ ) та використанням менш досконалих зерносушарок, технологічна доцільність та економічна ефективність попереднього нагрівання вологого шару зерна зростатимуть.

Наведені розрахунки експериментальних досліджень доводять, що за певних умов міжфазової взаємодії (значень швидкості робочих газів, стану рухомості шару зерна та перевищенні температури цих газів  $t_2$  температури зерна  $\theta_0$ ) температура шару зерна достатньо швидко зрівнюється із температурою робочих газів (впродовж 3...8 хв).

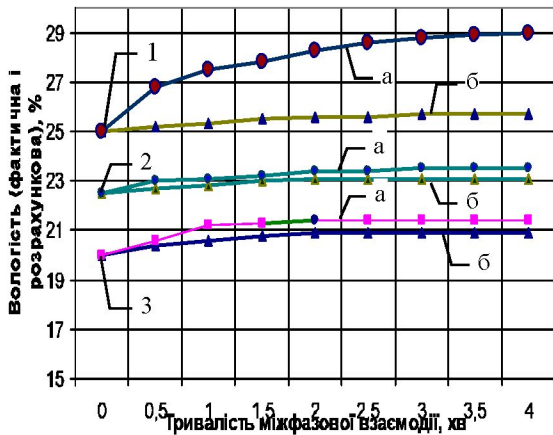


Рис. 1. Динаміка а) розрахункової та б) фактичної вологості зерна:  
 1- $\theta=6^\circ\text{C}$ ,  $W=20\%$ ;  
 2- $\theta=10^\circ\text{C}$ ,  $W=22,5\%$ ;  
 3- $\theta=11^\circ\text{C}$ ,  $W=25\%$ .

## **Висновки.**

1. При міжфазовій взаємодії газами 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**

1. Флауменбаум Б.Л. Основы консервирования пищевых продуктов / Б.Л. Флауменбаум, С.С. Танчев, М.А.Гришин // М.: Агропромиздат., – 1986. – 494 с.
2. Остапчук М.В. Наукові основи процесів зберігання зерна // Наукові праці ОНАХТ, вип. 29.т.2–С.58–62.
3. Гапонюк. Вплив параметрів довкілля на сушіння зерна // Ukrainian Food Journal. – К.- 2013 - Volume 2, Issue 3 – С.337-346.
4. Гапонюк І.І. Удосконалення технології сушіння зерна. [Монографія] – Одеса.: Поліграф, 2009. – 182 с.
5. Chuanping Liu. Size distribution in gas vibration bed and its application on grain drying / huanping Liu, Li Wang, Ping Wu, Fei Xiang// Powder Technology, Volume 221, May 2012, Pages 192-198
6. Magdalena Zielinska. Superheated steam drying characteristic and moisture diffusivity of distillers' wet grains and condensed distillers' solubles Original Research / Magdalena Zielinska, Stefan Cenkowski // Journal of Food Engineering, Volume 109, Issue 3, April 2012, Pages 627-634