

УДК 664.72.047,54:005.591.6

І.І.Гапонюк, д.т.н, професор, nuft2016@gmail.com

Національний університет харчових технологій, Київ

## ПРИКЛАДНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ РОБОЧИХ ГАЗІВ ШАХТНИХ СУШАРОК В ЗИМОВУ ПОРУ РОКУ

Попри очевидність факту найбільшої частки енерговитрат технологій сушіння зерна в сукупному агротехнологічному циклі його вирощування–післязбиральної обробки–зберігання, публікації з втрат теплоти та використання потенціалу робочих газів сушарок подаються вкрай обмежено.

З огляду на зростання валового виробництва та вартісних показників сушіння зерна нами були виконані дослідження параметрів робочих газів у виробничих умовах на найпоширенішому в вітчизняних господарствах двошахтному зерносушильному комплексі ДСП-32отх2.

Дослідження виконували в зимову пору року за авторською методикою із використанням контрольно-вимірювальної апаратури зерносушильного комплексу та залученої науковцями. Результати замірів показників, що дублювалися різною апаратурою, порівнювали і в разі їх відповідності приймали до опрацювання. В разі наявності відхилень показників замірів більш від двох відсотків – виконували повторні заміри і встановлювали причини розбіжностей. Межа в два відсотки була встановлена експериментально, як найменш можлива для фактичного розпилення фактичних даних по ширині й висоті шахти сушарки.

До числа фіксованих показників входили:

а) параметри робочих газів:

- температура на вході сушильну зону,  $t_1$  (°C);
- температура на виході з шару зерна кожного із 15-ти коробів горизонтальної площини шахти сушарки  $t_2$  (°C);
- температура на виході з шару зерна кожного із 14-ти коробів вертикальної площини шахти (°C);
- відносна вологість відпрацьованих газів в горизонтальних та вертикальних площинах  $\varphi_2$  (%);
- абсолютна вологість відпрацьованих газів в горизонтальних та вертикальних площинах  $d_2$  (г/кг<sub>с.п.</sub>);
- фактичну та фіктивні швидкості робочих газів  $v_\phi$  (м/с);
- температуру  $t_0$  (°C) й вологовміст довкілля  $d_0$  (г/кг<sub>с.п.</sub>);

б) параметри зерна:

- вхідна та вихідна відносна вологість  $W_0$  (%) та  $W_1$  (%) відповідно;
- температура зерна на вході в сушильну шахту  $\Theta_0$  (°C) і виході з неї  $\Theta_1$  (°C) в горизонтальних та вертикальних площинах шахти;
- вміст зернової та смітної домішок  $\delta_{30}$  (%) і  $\delta_{c0}$  (%) на вході в сушильну шахту і виході з неї  $\delta_{31}$  (%) і  $\delta_{c1}$  (%).

Проведені нами дослідження зі зневоднення зерна кукурудзи білозерної (натура 760 г/л) в шахтних зерносушарках вітчизняного виробництва за циклічного режиму сушіння дозволили встановити тісну залежність параметрів

фазових середовищ і втрати теплоти із цими газами від режимів сушіння, виду зневоджуваної культури та параметрів довкілля або сезону роботи сушарки. Найбільша вологонасиченість відпрацьованих газів та найменша температура відповідають початковому етапу тепловологообміну і з поглибленням зони сушіння в внутрішні шари тіла зернини – вологість зменшується а температура відпрацьованих газів зростає (табл.1). Відносна вологість відпрацьованих газів верхніх сушильних зон, як видно із табл.1, за паспортних режимів сушіння близька до максимально можливих значень, що припадає на першу третину періоду сушіння.

**Табл.1 – Тепловий аналіз роботи сушарки ДСП-32отх2**

Зони шахти сушарки	Витрати газів, 10 <sup>3</sup> м <sup>3</sup> /год, Продуктивність сушарки, фіз.кг/год	Температура, °С		Вологовміст т (d, г/м <sup>3</sup> ), вологість (u, %),		Швидкість газів, м/с		Ентальпія газів, I, МДж		Втрати теплоти з відпрацьованими газами, кг <sub>у.п.</sub> /год
		вхід.	вихід	вхід	вихід	фіктивна	на виході	вхідн	вихід	
1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Робочі газів:										
1	82	110	38	9	32	0,63	4,9	9555	3641	124
2	56	125	43	9	28	0,43	4,8	7325	2754	94
3	49	70	45	9	26	0,38	4,4	3791	2551	87
4	43	2	44	6	8	0,33	4,8	0	1841	63
Разом								20670	10787	368
Зерно кукурудзи:										
1	17778	11	28	24	22					
2		28	42	22	19					
3		42	49	19	16					
4		49	15	15	14					

**Висновки:** 1. Вологовміст відпрацьованих газів *d* зростає із підвищенням температури зерна від 28 до 44 г/м<sup>3</sup>;

2. З урахуванням теплоти пари, втрати теплоти із відпрацьованими газами сушіння однієї планової тонни зерна коливаються від 130 до 240 МДж;

3. Змінням градієнту тиску робочих газів в зневоджувальній камері, збільшенням швидкості їх течії і стану рухомості шару зерна можна суттєво зменшити ризик конденсації крапельної вологи на поверхню шару зерна.

#### **Література:**

1. Остапчук М.В. Наукові основи процесів зберігання зерна // Наукові праці ОНАХТ, вип. 29. т.2. – С. 58–62.

2. Гапонюк. Вплив параметрів довкілля на сушіння зерна // Ukrainian Food Journal. – К.-2013 - Volume 2, Issue 3 – С.337-346.

3. [www.schmidt-seeger.com](http://www.schmidt-seeger.com), <http://www.AgroNews.ru>.

Якщо виконати перерахунок втрат теплоти на нагрівання зерна, то з урахуванням технічних втрат, пов'язаних із конструкцією зерносушарки, цієї теплоти може вистачити для нагрівання однієї планової тони зерна більш як на 50 °С.

Для цього нами були досліджені тепло-масообмінні процеси шахтних прямотечійних зерносушарок при різних вхідних параметрах робочих газів ( $t_1$ ,  $d_1$ ,  $v_1$ ) і режимів зневоднення, встановлено параметри відпрацьованих газів по сушильним та охолоджувальній зонам сушарки ( $t_2$ ,  $d_2$ ,  $v_2$ ) та виконано аналіз фактичних замірів із розрахунковим даними [1, 2, 4, 7]. Якщо невисокий вологовміст відпрацьованих газів після зони охолодження ( $d_2 < 15$  г/кг<sub>с.п.</sub>) 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 ( $d_2 > 35$  г/кг<sub>с.п.</sub>) ускладнює їх повторне використання та ставить під сумнів економічну доцільність рекуперацію теплоти цих газів без їх зневоднення [2, 4] або обумовлює необхідність застосування складних теплоутилізуючих пристроїв.

Про спірність доцільності повторного використання теплоти відпрацьованих газів в сушильних зонах або топковому відділенні зважено аргументовано в ряді публікацій [4, 5]. За наведеними авторами розрахунків волого-теплого балансу сушіння зерна шахтних зерносушарок доведено, що вже починаючи із третього – четвертого циклу повернення відпрацьованих робочих газів в зерносушильний агрегат, а для роботи сушарок в осінньо–зимовий період – після другого – третього, суттєво погіршується паспортний режим вологообміну, що супроводжується зменшенням продуктивності сушильного агрегату і навіть призупиненням міжфазового вологообміну за наявності лише теплообміну. Тобто після четвертого циклу рекуперації теплоти відпрацьованих робочих газів в камеру сушарку процеси зневоднення вологого зерна припиняться і обмежаться лише його нагріванням до температури цих газів. Це означає, що використовувати теплоту відпрацьованих робочих газів із підвищеним вологовмістом ( $d_2 > 25 - 30$  г/кг<sub>с.п.</sub>) поверненням їх в зневоджувальний агрегат без спеціальної підробки (зневоднення) недоцільно, або їх слід використовувати лише для технологічних потреб зміни структурно-механічних властивостей матеріалу [5, 6].

З огляду на викладене, нами виконано дослідження з встановлення можливості використання теплоти цих газів для нагрівання вологого зерна і обґрунтування таких параметрів міжфазової взаємодії малорухомого шару

вологого зерна із робочими газами підвищеного вологовмісту, за яких максимально відбувається міжфазовий теплообмін і мінімально – вологообмін.

За умов конвективного тепловологообміну вологого зерна ( $\theta_0, W_0$ ) із відпрацьованими робочими газами ( $t_2, d_2$ ), змінюючи енергію вологи в поверхневому шарі ( $I_{н.ш.}$ ) та на поверхні тіла зернини ( $I_{н.з.}$ ) підведеною теплотою ( $Q_2$ ) й швидкістю течії робочих газів ( $v_2$ ) можна управляти градієнтом вологи фазових середовищ навіть за умов, коли рівновагова волога перевищує вологість зернини на початковому етапі тепловологообміну.

При значній різниці температур фазових середовищ, незначній відмінності вологовмісту цих середовищ ( $\delta t = (t_2 - \theta_0) \gg 0$ ,  $\delta W = (W_0 - W_{рівн}) \leq 0$ ) та за зустрічних градієнтів температури і вологи домінуючий вплив на дифузію вологи завдають лише енергетичні стани цієї вологи поверхневих шарів тіла зернини [ 6 ]. Оскільки вже на початковому етапі міжфазової взаємодії із надміру зволуженими газами, із-за суттєвого зменшення витрат енергії цих газів на зневоднення зерна, температура шару зерна стрімко зростає, а отже зростає енергетичний стан вологи в поверхневих шарах тіла зернини і одночасно із цим додатково зростає рушійний потенціал зневоднення зерна. Цей додатковий потенціал зневоднення зерна протидіє його зволоженню відпрацьованими робочими газами за умов перевищення рівновагової вологи над вологістю зерна.

Перевірку викладених припущень та уточнення кінетики тепло- і вологообміну міжфазових середовищ газами підвищеного вологовмісту параметрами близькими до відпрацьованих робочих газів зерносушильного агрегату було виконано на стендовій установці.

В ході досліджень змінювали показники параметрів робочих газів (температуру  $t_0$  (°C), вологовміст  $d_0$  (г/кг) та швидкість течії перед шаром зерна  $v_2$  і після  $v_3$  (м/с)) для різних вологості зневоджуваного зерна  $W_i$  (%) і початкової його температури  $\theta_i$  (°C). Товщину нерухомого шару зерна приймали 0,25 м.

Вологовміст робочих газів  $d_2$  (г/кг<sub>с.п.</sub>) задавали для граничних умов міжфазового тепловологообміну, тобто встановлювали більшим на 20...30 % від отриманих у виробничих дослідженнях значень для шахтних прямотечійних зерносушарок.

Збільшуючи вологовміст робочих газів від 6...10 г/кг<sub>с.п.</sub> (гази перед сушінням) до граничного вологовмісту за температури  $t_2 = 22...28$  °C ( $d_2 = 20,5...22,5$  г/кг<sub>с.п.</sub>), швидкість нагрівання зерна пшениці зростала в 8...11 разів і становила  $d\theta/d\tau = 4,5...6,5$  (°C/хв.). Більші значення швидкості нагрівання зерна відповідають умовам більшої різниці температури фазових середовищ та більшій швидкості течії газів.

Оскільки пронизуючи шар зерна робочі гази охолоджувалися і їх вологопоглинаюча спроможність зменшувалася, тому для часткового запобігання конденсації вологи на поверхню віддалених шарів зерна ( $\varphi_2 \geq 100$  %) збільшували швидкість течії цих газів та змінювали градієнт тиску. Для цього встановлювали повітродувну машину після тепловологообмінної камери.

Розрахункове значення кінцевої вологості нагрітого в теплообмінній камері зерна ( $W_p$ ) встановлювали по величині конденсату  $\delta W_{\text{конд}}$  ( $W_p = W_0 + \delta W_{\text{конд}}$ ) та співставляли з даними отриманими стандартним способом в сушильній шафі. Величину конденсату  $\delta W_{\text{конд}}$  встановлювали по добутку різниці вологовмісту газів перед шаром зерна  $t_2$  ( $d_t$ ) на витрати робочих газів  $L$  ( $\text{м}^3/\text{хв}$ ):

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

За умов перевищення рівновагової вологості й температури робочих газів над відповідними параметрами зерна ( $W_p > W_0$ ,  $t_2 > \theta_i$ ) кінцева вологість зерна  $W_2$ , зростала на величину сорбованої вологи із насичених вологою газів  $\delta W_{\text{сорб}}$  та конденсату на поверхні зерна  $\delta W_{\text{конденс}}$  ( $W_2 = \delta W_{\text{сорб}} + \delta W_{\text{конденс}}$ ). По показникам вологовмісту газів ( $d_t$ ), 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  $\delta W_{\text{конденс}}$ . І зі змінням способу підведення газів та збільшенням швидкості течії робочих газів фактична вологість зерна ще більше зменшувалась.

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

Отримана динаміка розрахункової та фактичної вологості зерна пшениці при міжфазовій взаємодії із надміру зволженими газами ( $t_2 = 26 - 28^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_2 \approx 100\%$ ,  $d_2 = 20 - 21 \text{ г/м}^3$ ) дозволила підтвердити можливість зменшення вологи шару зерна на 2 - 6% порівняно із розрахунковими даними. З подальшим

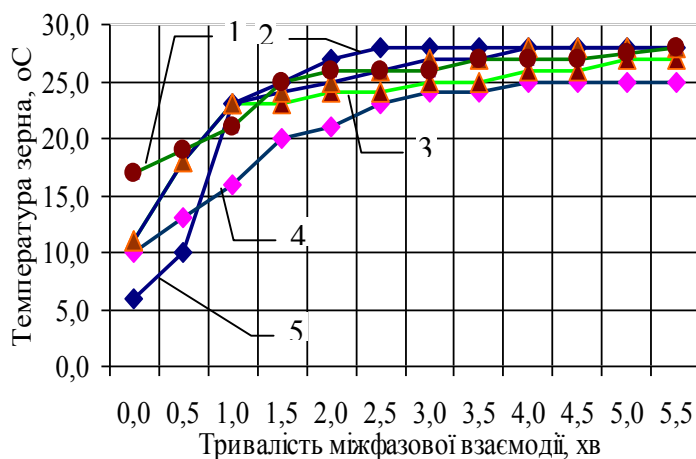


Рис. 3. Динаміка температури зерна різних значень  $W_0$  і  $\theta_0$ : 1 –  $W_0 = 17,5\%$ ; 2 –  $W_0 = 25\%$ ; 3 –  $W_0 = 25\%$ ; 4 –  $W_0 = 22,5\%$ ; 5 –  $W_0 = 20\%$ .

збільшенням швидкості течії газів у 2,5 разів фактична вологість зменшується ще суттєвіше – на 11...14%.

Оскільки остаточною оцінкою доцільності заходу із модернізації технології (процесу) є економічна доцільність [2], тому нижче наведемо аналіз витрат енергії при міжфазовій взаємодії зерна з робочими газами для параметрів фазових середовищ наближених до виробничих. Найбільш характерними для літнього періоду роботи сушарок є параметрами відпрацьованих газів з температурою  $t_2 \leq 50^\circ\text{C}$  та вологістю  $\varphi_2 \approx 90\%$ , верхньої сушильної зони і  $\varphi_2 \approx 55\%$ , нижньої [4].

Із врахуванням конструктивних особливостей шахтних зерносушарок та газопроводів з підведення відпрацьованих газів для повторного використання їх теплоти, втрати теплоти можуть становити від 7% [ 3 ] до 15% [ 1, 2, 4]. Для наведених нижче розрахунків економічної доцільності використання теплоти цих газів приймемо граничні, найнесприятливіші для рекуперації теплоти, умови. Тобто умови з найменшою температурою відпрацьованих газів та максимально-можливою відносною їх вологістю, що відповідають параметрам роботи кращих зразків імпортних зерносушарок або модернізованих вітчизняних в осінню пору року: температура відпрацьованих газів перед шаром зневоджуваного зерна приймемо  $t_2 \leq 30$  °С, відносну вологість відпрацьованих газів, з урахуванням найінтенсивнішого вологообміну та зменшення їх температури при транспортуванні, приймемо  $\varphi_2 \approx 99$  %, із відповідним вологовмістом  $d_2=20...21$  г/м<sup>3</sup>.

Температура зерна зібраного урожаю впродовж доби може змінюватися в широкому діапазоні  $\theta_0 = 5 - 20$  °С, а вологість  $W_0 = 15 - 30$  %.

При нагріванні вологого зерна відпрацьованими газами його температура не може перевищувати температуру теплоносія ( $\theta_1 \leq t_2$ ,  $\theta_1 \approx 28$  °С) і за несприятливих умов зерно може додатково зволожитися на  $\delta W = 0,5 - 1,5$  %.

Витратити теплоти  $Q_{\delta\theta}$  для нагрівання зерна до температури відпрацьованих газів становлять [1, 2]:

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

де  $G$  – маса зерна, кг;  $c_0$  – питома теплоємність зерна при вологості  $W_0$ , кДж/(кг·К);  $\theta_0$  і  $\theta_1$  – кінцева та початкова температура зерна, °С.

Витрати теплоти на зневоднення додаткової вологи зерна, що може потрапити в шар зерна з відпрацьованими газами під час його нагрівання можна розрахувати за відомою формулою [1, 2]:

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

де  $r$  – схована теплота пароутворення при температурі зерна  $\theta_1$ , кДж/кг<sub>вол.</sub>;

$\Delta r$  – питома теплота на подолання внутрішнього опору дифузії вологи, кДж/кг<sub>вол.</sub>;

$\delta W$  – величина висушування вологи із зерна, кг.

За виконаними розрахунками вказаного способу нагрівання зерна пшениці відносної вологості  $W_0=17,5 - 20\%$  і температури  $\theta_0 = 16 - 17$  °С робочими газами з вологовмістом  $d_2 = 20,5 - 22,5$  г/м<sup>3</sup> і температурою  $t_2=28$ °С, економія теплоти становить:

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

Або в перерахунку на природний газ, що використовують вітчизняні зернозаготівельні підприємства, для однієї тони зерна економія теплоти становить 0,45...0,66 м<sup>3</sup>/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).

### **Висновки:**

1. Із відпрацьованими робочими газами зерносушильних агрегатів вітчизняного та закордонного виробництва втрачається більша частка теплоти від розрахунково-необхідної для зневоднення зерна;
2. Використання теплоти відпрацьованих газів після сушильних зон для зневоднення зерна є можливим лише за умов їх спеціальної підготовки.
3. Теплотою відпрацьованих газів можна розрахунково нагріти вологе зерно перед його зневодненням на більш як на 50 °С без спеціальної їх обробки;
4. Швидкість нагрівання шару вологого зерна газами підвищеного вологовмісту ( $d_2 = 20,5...22,5$  г/м<sup>3</sup>) і температури близької до виробничих умов ( $t_2 = 30...40$  °С) у 8...11 разів більша від цього показника невідпрацьованими робочими газами ( $d_0 = 8,5...9,5$  г/м<sup>3</sup>,  $t_1 = 90...110$  °С);
5. Зміненням градієнту тиску робочих газів в зневоджувальній камері, збільшенням швидкості їх течії і стану рухомості шару зерна можна суттєво зменшити ризик конденсації крапельної вологи на поверхню шару зерна.
6. В стендових умовах доведено можливість використання теплоти відпрацьованих робочих газів з граничною відносною вологістю ( $\varphi_2 \approx 97...99$  %) та технологічний спосіб і режими за яких технологічно доцільно нагрівати вологе зерно перед його зневодненням;
7. Доведено економічну доцільність міжфазового теплообміну шару зерна із відпрацьованими робочими газами зерносушильних агрегатів.

### **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. Вітчизняні зерносушарки: стан та перспектива // Хранение и переработка зерна. – 2014. – № 2 (179) – С.25–29.
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 (Змінення величини перемінного газового потоку (bed) і його застосуванні для сушіння зерна)

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 (Перегріта пара, що сушить характеристику і diffusivity вологості зерен вологості дистиляторів, і ущільнює)

7. [www.schmidt-seeger.com](http://www.schmidt-seeger.com), <http://www.AgroNews.ru>.