

ПРИСКОРЕНЕ НАГРІВАННЯ ЗЕРНА КОНВЕКТИВНИМ СПОСОБОМ

І.Гапонюк, д.т.н., проф. НУХТ

Анотація: вузьким місцем відомих технологій сушіння зерна є недостатня швидкість сушіння, що пов'язано із повільним нагріванням вологого зерна на початковому етапі його сушіння, та суттєві втрати теплоти із відпрацьованими сушильними газами. Наразі відомі певні технологічні рішення попереднього нагрівання зерна перед його сушінням та пристрої з утилізації теплоти відпрацьованих сушильних газів. Зокрема в рециркуляційних сушарках вологе зерно попередньо нагрівають висушеним і неохолодженим зерном, в інших використовують теплоту інфрачервоного опромінення або здійснюють нагрівання в кондуктивних теплообмінниках, тощо. Проте техніко-технологічна складність реалізації одних та економічна невиправданість інших обмежують їх широке практичне застосування. Теж саме стосується рекуперації теплоти відпрацьованих сушильних газів. Наразі широкого практичного застосування отримав лише спосіб рекуперації теплоти відпрацьованих охолоджувальних газів сушарки. Поряд із цим відомо, що із відпрацьованими сушильними газами втрачається найбільша частка теплоти сушіння, до 35 % і більше. Однак надмірна вологість цих газів обмежує їх технологічне використання без спеціальної їх обробки. В даній роботі нами представлено теоретично обґрунтований конвективний спосіб та певні режими нагрівання шару вологого зерна перед його сушінням відпрацьованими сушильними газами. За обґрунтованих режимів цього способу нагрівання вологе зерно в десятки разів швидше нагрівається від традиційних способів і при цьому не суттєво змінює свою вологість. Експериментальними дослідженнями доведено технологічну можливість та економічну доцільність вказаного способу попереднього нагрівання зерна. Використання теплоти відпрацьованих сушильних газів для цих потреб дозволить до 25 % прискорити сушіння зерна та до 35 % зменшити енергоємність сушіння. Розроблений нами спосіб не потребує значних капіталовкладень і може бути застосованим для існуючих конструкцій вітчизняних чи закордонних шахтних зерносушарок.

Загальний огляд питання. Такі показники технології сушіння, як швидкість сушіння зерна, пошарова в тілі зернини рівномірність вологовмісту та хімічні зміни термолабільних складових пов'язані не лише із температурою тіла зернини в цілому, а й характером нагрівання шару зерна, способом теплообміну й температурою шарів тіла зернини. Оскільки швидкість сушіння зерна і рівномірність сушіння перебуває в степеневій залежності від його температури, тому в практичній діяльності шар зерна намагаються якомога швидше нагріти до межових значень. Проте за умов міжфазового тепловологообміну з нагрітими робочими газами зерно на початковому етапі сушіння не лише не нагрівається, але й може дещо охолоджуватися. Це пояснюється пріоритетним використанням теплоти робочих газів на фазові перетворення

вологи, що міститься в поверхневих шарах зернини, та дефіцитом енергії цих газів для подальшого нагрівання тіла зернини. Зі збільшенням вмісту вологовмісту й розмірів тіла зернини зростає не лише тривалість нагрівання, а й поширення в тілі зернини неоднорідності вологовмісту та температури, що спричиняє мікро-травмування тіла зернини, пошкодження хімічних складових та перевитрат теплоти [1, 4, 6]. За відомих технологій сушіння тривалість нагрівання шару зерна різних розмірів тіла зернини та вологовмісту може коливатися від 10 – 15 до 90 – 120 хвилин, а мікро травмування зерна зростає до 25 % і більше [3, 7].

Обґрунтування ідеї. Про актуальність нагрівання шару зерна свідчить пряма залежність кінетики його нагрівання із кінетикою та енергоємністю зневоднення [5, 6]. Це пов'язано із тим, що швидкість внутрішньої та зовнішньої дифузії вологи в порах тіла зернини перебуває в степеневій залежності від температури тіла зернини. А інтенсивність сушіння зерна, в свою чергу, прямо пов'язана із швидкістю дифузії вологи в цих порах. Тому на початковому етапі сушіння важливим є швидке нагрівання зневоджуваного тіла. Для цього слід створити умови міжфазового теплообміну за якого якомога більша частка теплоти сушильних газів буде витрачатися на нагрівання зерна, а менша – на його зневоднення. Такі умови характеризуються мінімальними значеннями критерію Косовича ($K_o \rightarrow 0$).

На нашу думку, найбільш технологічно прийнятним та економічно доцільним способом забезпечення умов набуття вимог $K_o \rightarrow 0$ для конвективних сушарок є використання відпрацьованих робочих газів підвищеного вологовмісту. В цьому разі різниця вологовмісту фазових середовищ (парціальних тисків) набуває мінімальних значень і теплота робочих газів буде максимально використовуватися для нагрівання тіла зернини. Тобто $K_o \rightarrow 0$. проте для запобігання або зменшення ризику зволоження зерна конденсатом пари цих газів слід встановити раціональні режими міжфазової взаємодії.

Результати досліджень. Фактичні дані показників відпрацьованих сушильних газів, отримані нами з сушіння зерна різних культур для різних сезонів роботи сушарок, дозволили встановити технологічну і економічну доцільність їх застосування для попереднього нагрівання шару зерна. Температура цих газів перевищує температуру вологого зерна в літній період від 15 – 25 °С та зимовий – 30 – 45 °С.

Теплоту відпрацьованих сушильних газів з урахуванням пари, що міститься в них, можна розрахувати за відомою формулою різниці ентальпій газів довкілля (I_0) та відпрацьованих (I_2):

$$Q_{н.з} = M \cdot (I_2 - I_0), \quad (1)$$

де I_0 і I_2 — відповідно ентальпія повітря довкілля та відпрацьованих сушильних газів при вологовмісті повітря d_0 , та газів d_1 , кДж/кг с.п., M – витрати робочих газів сушіння зерна, кг/год

Розглядаючи повітря довкілля та відпрацьовані робочі гази як суміш газів та пари, що міститься в них, відповідно ентальпію можна виразити, в наближеному й прийнятному для подальших розрахунків, через теплові характеристики складових газів:

$$Q_{н.з} = M \cdot [c_{с.п} \cdot (t_2 - t_0) + \lambda_0 \cdot (d_1 - d_0) + c_n \cdot (d_1 \cdot t_2 - d_0 \cdot t_0)], \quad (2)$$

де; t_0 і t_2 – температури газів довкілля та відпрацьованих сушильних газів, °С; d_0 і d_1 – вологовмісти повітря довкілля та відпрацьованих сушильних газів, г/кг_{с.п}; $c_{с.п}$ – питома теплоємність сухого повітря, кДж/кг (с_{с.п} = 1,004 кДж/кг_{с.п}); λ_0 – теплота пароутворення за температури $t = 0$ °С ($\lambda_0 = 2500$ кДж/кг); c_n – питома теплоємність перегрітої пари, кДж/кг (с_п = 1,842 кДж/кг).

З урахуванням теплоти газів повітря і пари, що міститься у відпрацьованих газах, втрати теплоти із цими газами в перерахунку на сушіння однієї планової тонни зерна для різних умов сушіння можуть становити від 130 до 240 МДж/1 пл.т, або в перерахунку на теплоутворюючу спроможність природного газу – 4,2...7,8 м³/1 пл.т.

Цієї теплоти може вистачити для нагрівання однієї тони вологого зерна на 50 – 100 °С. Приймаючи до уваги технічні втрати теплоти конвективного теплообмінника можна стверджувати, що теплою відпрацьованих сушильних газів можна гарантовано нагріти одну тону зерна до граничної температури.

Для уточнення раціональних режимів конвективного нагрівання зерна відпрацьованими робочими газами, відповідно до вимог $K_o \rightarrow 0$ та меншого ризику зволоження зерна, були виконані експериментальні дослідження наближені до виробничих умов по товщині шару зерна різних конструкцій сушарок ($h=0,22 - 0,31$ м) та параметрам відпрацьованих газів. Вологовміст (d_1) та відносну вологість (φ_2) відпрацьованих сушильних газів в дослідях задавали на 20...30 % більшими від середніх виробничих показників шахтних прямотечійних зерносушарок. Тобто умови нагрівання зерна ми задавали складніші від виробничих за показниками міжфазового вологообміну.

Дослідженнями конвективного тепловологообміну вологого зерна (θ_0, W_0) із відпрацьованими сушильними газами (t_2, d_1), за яких $t_2 \gg \theta_0$ і $W_0 \leq W_{ривн}$, встановлено, що підведеною теплою цих газів (Q_2), а також перемінною швидкістю їх течії (v_2) можна управляти енергію вологи в поверхневому шарі зерна ($I_{н.ш.}$) та на поверхні тіла зернини ($I_{н.з.}$) і відповідно градієнтом вологи фазових середовищ.

Експериментально доведено, що за умов значної різниці температур фазових середовищ ($(t_2 - \theta_0) \gg 0$), незначній відмінності вологовмісту цих середовищ ($W_{ривн} \approx W_0$) та за зустрічних градієнтів температури й вологи, на напрямок міжфазової дифузії вологи більш суттєво впливає енергетичний стан цієї вологи в поверхневих шарах тіла зернини [6]. Це можна пояснити тим, що вже на початковому етапі міжфазової взаємодії температура шару зерна стрімко зростає і відповідно зростає енергетичний стан вологи в поверхневих шарах тіла зернини. Це в свою

чергу спричиняє зростання рушійного потенціалу зневоднення зерна. На нашу думку цей додатковий потенціал зневоднення зерна скоріше за все протидіє його зволоженню вологими газами за умов перевищення рівновагової вологи над вологістю зерна.

Швидкість нагрівання шару зерна ячменю товщиною $h = 0,25$ м газами підвищеного вологовмісту ($d_0 = 20...21$ г/кг_{с.п.}) зростала в 8...11 разів порівняно із сухими газами ($d_0 = 6...10$ г/кг_{с.п.}) такої ж температури ($t_2=22...28$ °С) і становила $d\theta/dt = 4,5...6,5$ (°С/хв.). Більші значення швидкості нагрівання зерна відповідали умовам більшої різниці температури фазових середовищ ($t_2-\theta_0$) та більшої швидкості течії газів v_2 .

Для запобігання пароконденсації на поверхні віддалених шарів зерна ми збільшували швидкість течії газів підвищеного вологовмісту (v_2) від 0,2 до 2,7 м/с та змінювали градієнт тиску газів ($\pm H$).

Значення фактичної вологості зерна (W_i) під час його нагрівання в теплообмінній камері встановлювали по величині конденсату δW_{nap} ($W_i = W_0 + \delta W_{nap}$) та співставляли із даними отриманими стандартним способом в сушильній шафі. Величину конденсату δW_{nap} встановлювали за добутком різниці вологовмісту газів перед і після шару зерна (d_1, d_2) на витрату робочих газів L :

$$\delta W_{nap} = L \cdot (d_1 - d_2) / 1000, \quad (3)$$

Поточну температуру шару зерна встановлювали за показниками термодатчиків, розміщених в шарі зерна.

На рис. 1 представлено динаміку температури зерна ячменю різної вологості ($W_0=13...25$ %) при нагріванні його теплими газами підвищеної вологості ($t_2= 26...28$ °С, $\varphi_2 \approx 97...99$ %, $d_1=20...21$ г/м³). Кінетику температури контрольного зразка зерна ячменю вологістю $W_0 = 25$ % і початкової температури $\theta_0 = 12$ °С для режимів нагрівання сухими газами ($d_0 = 6...10$ г/кг_{с.п.}) тієї самої температури ($t_2= 26...28$ °С) представлено графічною залежністю 5 рис. 1.

На рис.2 представлено кінетику вологості шару зерна пшениці при його нагріванні цими ж газами. Отримані показники розрахункової та фактичної вологості зерна пшениці дозволили підтвердити можливість зменшення вологи шару зерна на 2 – 6% порівняно із розрахунковими даними встановленими режимами теплообміну.

Експериментально доведено, що зі збільшенням різниці температур фазових середовищ зменшується фактичне зростання вологості зерна за результатами зволоження його конденсатом газів (графіки б) рис.2) порівняно із розрахунковими (графіки а) рис.2). Розрахункове збільшення вологи зерна початкової температури $\theta=6$ °С (графічна залежність 1а) рис.2) становить $\Delta W=1,9$ %. Проте фактичне, за встановлених режимів подачі відпрацьованих сушильних газів, лише $\Delta W=0,2$ %. Зі збільшенням початкової температури зерна $\theta=11$ °С і його вологості $W_0=25\%$ (графічна залежність 3а і 3б рис.2) ризик зволоження зерна при його нагріванні відпрацьованими сушильними газами суттєво зменшується.

Дослідами встановлено, що крім різниці температур фазових середовищ ($\theta_0 - t_2$) на зволоження конденсатом цих газів суттєво впливає також швидкість пронизування шару зерна.

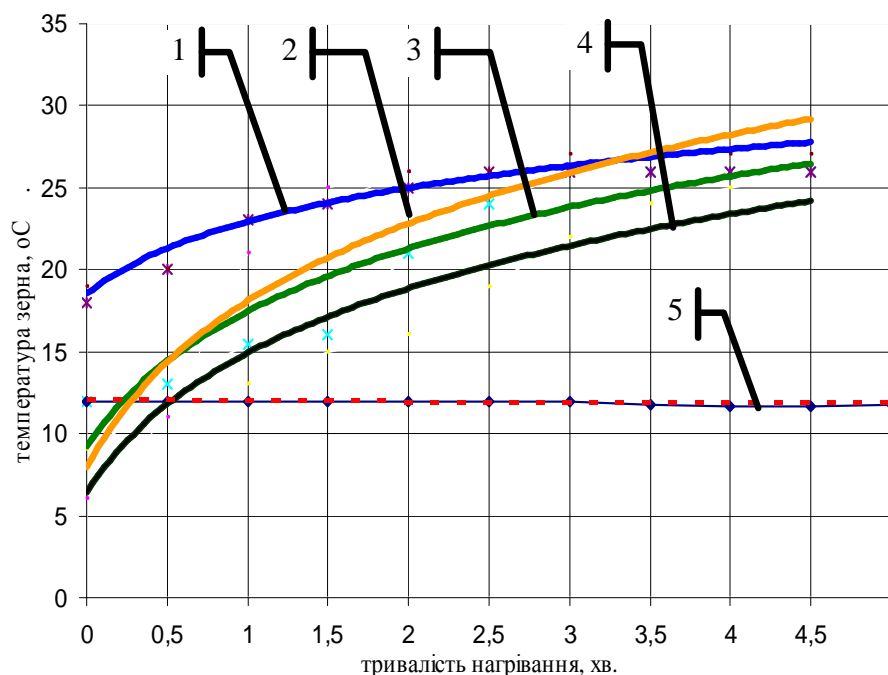


Рис.1 –Динаміка температури зерна ячменю різної вологості (W_0) і температури (θ_0): 1 – $W_0=25\%$, $\theta_0=19^\circ\text{C}$; 2 – $W_0=20\%$, $\theta_0=12^\circ\text{C}$; 3 – $W_0=25\%$, $\theta_0=9^\circ\text{C}$; 4 – $W_0=13\%$, $\theta_0=9^\circ\text{C}$; 5 – $W_0=21\%$, $\theta_0=12^\circ\text{C}$.

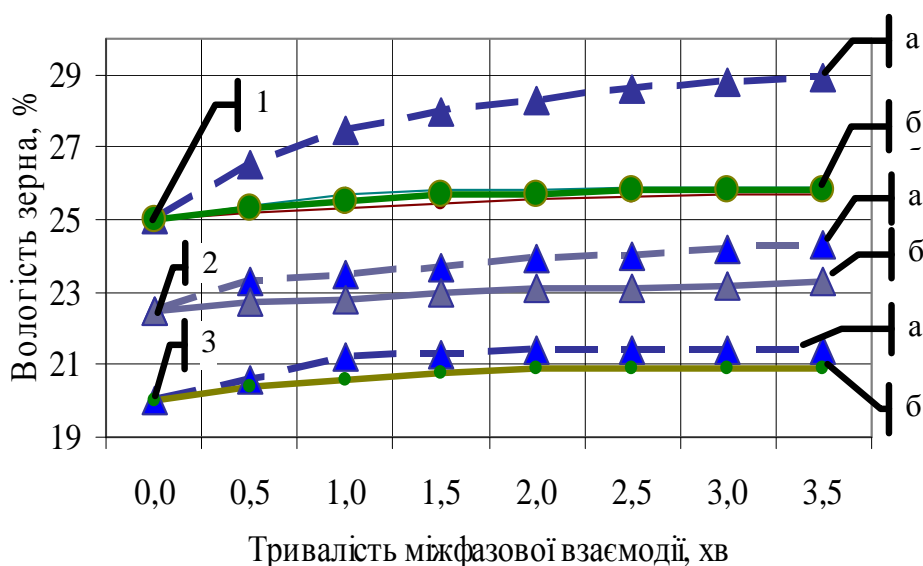


Рис.2 – Динаміка вологості зерна пшениці а) – розрахункової та б) – фактичної: 1 – $\theta - \theta_0 = 6^\circ\text{C}$, $W_0=20\%$; 2 – $\theta - \theta_0 = 10^\circ\text{C}$, $W_0=22,5\%$; 3 – $\theta - \theta_0 = 11^\circ\text{C}$, $W_0=25\%$.

можуть становити від 7% [3] до 15% [1, 2, 4].

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

Так, зі збільшенням швидкості течії вологих газів ймовірність зволоження зерна конденсатом цих газів зменшується.

Нижче наведено розрахунки економічної доцільності способу нагрівання вологого зерна відпрацьованими сушильними газами. Для літнього періоду роботи сушарок характерними є такі параметри відпрацьованих газів:

температура $t_2 \leq 50^\circ\text{C}$,

вологість верхньої сушильної зони $\varphi_2 \approx 90\%$ 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 через поверхні нагрівання газопроводів та теплообмінної камери

Очевидно, що при нагріванні вологого зерна відпрацьованими газами його температура не може перевищувати температуру теплоносія ($\theta_1 \leq t_2$, $\theta_1 \approx 28$ °С), а вологість зерна для найгірших умов міжфазової взаємодії може додатково зволожитися на $\delta W = 0,5 - 1,5$ %.

Витратити теплоти $Q_{\delta\theta}$ для нагрівання зерна до температури відпрацьованих газів можна розрахувати за відомою формулою [1, 2]:

$$Q_{\delta\theta} = G \cdot c_0 \cdot (\theta_1 - \theta_0), \quad (4)$$

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, °С.

Витрати теплоти зневоднення додаткової вологи зерна (конденсату), що може потрапити в нього з відпрацьованими газами можна розрахувати за відомою формулою [1, 2]:

$$Q_{\delta W} = G \cdot \delta W \cdot (r + \Delta r), \quad (5)$$

де r – схована теплота пароутворення при температурі зерна θ_1 , кДж/кг_{вол.}; Δr – питома теплота на подолання внутрішнього опору дифузії вологи, кДж/кг_{вол.}, δW – величина конденсату вологи на поверхні зерна, кг.

За виконаними розрахунками вказаного способу нагрівання зерна пшениці відносної вологості $W_0 = 17,5 - 20\%$ і температури $\theta_0 = 16 - 17$ °С відпрацьованими сушильними газами вологовмісту $d_2 = 20,5 - 22,5$ г/м³ і температури $t_2 = 28$ °С, економія теплоти може становити:

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

Або в перерахунку на природний газ з нагрівання однієї тони зерна – 0,45...0,66 м³/т.

Крім цього слід відмітити такі технологічні переваги попереднього нагрівання даним способом, як десятикратне зростання швидкості нагрівання вологого шару зерна перед його зневодненням. А це дозволить не лише прискорити внутрішньо-капілярну дифузію вологи й вирівняти пошарову в тілі зернини неоднорідність вологовмісту, а й зменшити ризик пошарового в зернині перегрівання термолабільних складових.

Наведені розрахунки експериментальних досліджень доводять, що за вказаних умов міжфазової взаємодії (швидкості течії робочих газів, стану рухомості шару зерна та різниці температури газів t_2 і температури зерна θ_0) шар зерна у більш як десять разів швидше нагрівається порівняно із традиційними способами нагріванням зерна сухими газами..

Висновки:

1. Найбільша частка втрат теплоти сучасних технологій сушіння зерна припадає на відпрацьовані сушильні гази. В більшості сушарок вітчизняного виробництва ці втрати 35...45 % загальних витрат теплоти та іноземних – 25...40 %;

2. Температура відпрацьованих сушильних газів перевищує температуру зерна влітку на 15 – 25 °С та взимку на 3 – 45 °С, абсолютний вологовміст становить 21 – 23 г/кг_{с.п.} Теплою цих газів можна нагріти майже вдвічі більше зерна, що подається на цю саму зерносушарку;

3. Швидкість нагрівання вологого зерна відпрацьованими сушильними газами в десять разів перевищує швидкість нагрівання сухими газами і тривалість його нагрівання до температури цих газів становить 2...5 хв;

4. Заданими режимами міжфазової взаємодії (швидкість їх течії, стан рухомості шару зерна і спосіб підведення газів) можна суттєво зменшити ризик конденсації крапельної вологи на поверхні шару зерна;

5. Експериментально доведено технологічну можливість та доцільність використання теплоти відпрацьованих сушильних газів з граничною відносною вологістю ($\varphi_2 \approx 97...99\%$) для попереднього нагрівання вологого зерна перед його зневодненням та випробувано технологічний спосіб і режими за яких зневоджуване зерно майже в десять разів швидше нагрівається і зволожується лише на $\delta W = 0,3 - 1,7\%$.

6. За фактичних показників відпрацьованих робочих газів шахтних зерносушарок ($\varphi = 45...75\%$) ризик зволоження зерна підчас його нагрівання цими газами буде ще меншим;

7. Повторним використанням теплоти відпрацьованих сушильних газів для нагрівання зерна перед його зневодненням можна на $0,45...0,66 \text{ м}^3/\text{т}$ зменшити питомі витрати сушіння в перерахунку на природний газ.

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
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

Improvement of technology of drying of grain rapid heating of the grain and recuperation wet gases

I. Gaponyuk, doctor of technical Sciences, Professor, NUFT

Abstract: the bottlenecks of known technologies of grain drying is a slow drying speed, which is associated with the slow heating of wet grain at the initial stage of drying and substantial loss of heat from the exhaust drying gases. At the moment, certain technological solutions preliminary heating of grain before drying and the device utilization of heat of exhaust drying gas. In particular in a recirculation drying damp granule is dried and preheated not cooled the grain, others use the warmth of infrared radiation or conductive heating is carried out in heat exchangers, and the like. However, the complexity of practical implementation, lack of their performance or economic unjustified limiting their wide practical use. This also applies for the heat recovery of the spent drying gas. Now wide application was received only method of heat recovery of exhaust cooling gas dryers. Along with this, it is known that with the used drying gases the most heat is lost to 35 % or more. However, excessive moisture restricts their practical use without special treatment. In this paper, we pre-specified theoretically convective method and certain modes of heating of the layer of wet grain before drying drying exhaust gases. For reasonable modes of the method of heating wet grain ten times faster heated by traditional methods in the dryer and it does not significantly change its moisture content. Experiment-based studies have shown the technological feasibility and economic feasibility of the method of pre-heating of the grain. The use of heat of exhaust drying gas for these needs will allow up to 25% to accelerate the drying of grains and up to 35% lower energy for drying. The developed method does not require significant capital investment and can be applied to existing designs of domestic or foreign mine dryers.

An overview of the issue. Such indicators drying technologies, the speed of grain drying, layer-by-layer in a body of grain of uniform moisture content and chemical changes of heat-labile components associated not only with the body temperature of the grain as a whole, but the nature of the heating of the layer of grains, a method of heat exchange and temperature layers of the body of the seed. Because the grain of thermo-labile refers to a capillary-porous colloidal bodies, therefore, to eliminate unwanted structural-mechanical and chemical effects of drying in the practice of trying as quickly as possible and to boundary values heat the layer of grain. However, under the terms of interphase heat-exchange with the hot working gases grain at the initial stage of drying is not only not heated, but might be cool. This is due to the priority use of the heat of working gases on phase transitions of moisture contained in the surface layers of the grain, and shortage of energy of these gases to further heat directly to the body of the seed. With the increase in the content of moisture content and size of grains increases not only the duration of heating, but also in the body layer-by-layer

particles and a layer of grain of heterogeneity of moisture content and temperature [1, 4, 6]. As a result, the heating time of the layer of grain in the silo grain dryers from different manufacturers can vary from ten to fifteen minutes to one and a half to two hours [3, 7].

Justification of ideas. The relevance of the heating layer of the grain shows a direct correlation of the kinetics of heating it with the kinetics and energy of dehydration [5, 6]. This is due to the fact that the speed of internal and external diffusion of moisture in the pores of the body of the seed is stepanovi according to the temperature of the body of the seed. And the intensity of grain drying, in turn, is directly related to the rate of diffusion of moisture in these pores. Therefore, at the initial stage of drying, rapid heating is important savagefang body. To do this, create the conditions of interphase heat exchange in which the greatest degree possible of heat the drying gases will be wasted on heating of the grain, and the lesser on its dehydration. Such conditions are characterized by minimum values of the criterion of Kosovich ($Ko \rightarrow 0$).

In our opinion, the most appropriate technology and cost-effective way of ensuring that the conditions of acquiring the requirements $Ko \rightarrow 0$ is using convection method using working gases of high moisture content. In this case, the difference of the vapor phase environments (partial pressures) becomes a minimum, and the heat of working gases will be most used for heating the body of the seed. That is $Ko \rightarrow 0$.

The results of the research. The actual data of the indicators of exhaust drying gases obtained from the drying of different crops for different seasons of work in the dryer, allowed to establish the technological and economic feasibility of their use for pre-heating the layer of grain. The temperature of these gases exceeds the temperature of the wet grain from 15 – 25 °C, summer up to 30 – 45 °C in the winter. The heat of the exhaust drying gas given the vapor contained in them can be calculated by the known form of the difference of the enthalpies of the gases of the environment (I_0) and waste (I_2):

$$Q_{h.3} = M \cdot (I_2 - I_0), \quad (1)$$

where I_0 and I_2 respectively, the enthalpy of the ambient air and exhaust of the cooling agent of grain at moisture content of air d_0 , d_1 , kJ/kg C. p, M — the cost of working gases for the drying of grain, kg/h

Considering ambient air and waste gases as the working mixture of gases and vapors contained in them, respectively, the enthalpy can be expressed in a similar and acceptable for further calculations, using the thermal characteristics of the components of the gases:

$$Q_{h.3} = M \cdot [c_{c.n} \cdot (t_2 - t_0) + \lambda_{o'} \cdot (d_1 - d_0) + c_{n'} \cdot (d_1 \cdot t_2 - d_0 \cdot t_0)], \quad (2)$$

where; t_0 and t_2 — the temperature of the gas environment and the spent drying gas, °C; d_0 and d_1 the moisture content ambient air and dryer exhaust gases, g/kg.p; SS.p — the specific heat of dry

air, kJ/kg, s. n = 1,004 kJ/kg C. p; λ_0 is the heat of vaporization at temperature $t = 0$ °C, $\lambda_0 = 2500$ kJ/kg; SP – specific heat of superheated steam, kJ/kg SP = 1,842 kJ/kg.

With the warmth of steam contained in the exhaust gases, loss of heat from these gases from the calculation of the drying routine one ton of grain ranged from 130 to 240 MJ/1 booth.t, or in terms of teplotvornaja the ability of natural gas – ...4,2 7,8 m³/1 booth.t. This heat may be enough to heat one ton of wet grain at 50 – 100 °C. Taking into account the technical losses of heat of the convective heat exchanger can be argued that the warm waste gases of the drying you can heat one ton of grain at 30 – 50 °C. So, the technological feasibility of pre-heating the wet layer of the grain prior to its dehydration and the presence of heat losses with exhaust gases led to our further investigation of the justification of the modes and parameters of the convective method of heating wet grain gases with high the moisture content.

Studies on the bench set has allowed us to establish the possibility of using the heat of these gases for the heating of wet grain and justify the parameters phase-to-phase interaction in the sedentary layer of wet grain with a waste drying gases of high moisture content at which the maximum mitasova heat transfer and minimal moisture. The results of our investigations showed that in convective Teploobmen wet grain (θ_0, W_0) with the exhausted drying gases (t_2, d_1), changing the energy of the moisture in the surface layer (I p. m.) and on the surface of the body of the seed (PI.with.) summed up by the heat of these gases (Q_2) and the flow rate of working gases (v_2) to control the phase gradient of moisture environments even under conditions when pre rivnovaha moisture grain moisture at the initial stage of Teploobmen.

If the ambient temperature phase environments, a slight difference of moisture content of these environmental ($\delta t = (t_2 - \theta_0) >> 0$, $w = (W_0 - W_{balance}) \leq 0$) and the counter-gradients of temperature and moisture dominant influence on the moisture diffusion is applied only to the energy States of this moisture in the surface layers of the body of grain [6]. Because already at the initial stage of phase-to-phase interaction with the excessively humidified gases, the temperature of the layer of grains is growing rapidly (due to a significant reduction of the energy consumption of these gases for the dehydration of the grain) and thus increases the energy state of moisture in the surface layers of the body of grain, so at the same time further increased also and the driving potential of dehydration of the grain. This additional capacity dewatering grain most likely inhibit its hydration humid drying gases under conditions of excess runawaylove moisture over the moisture content of the grain.

In the course of research, we changed the parameters of working gases (temperature t_0 (°C), moisture content d_0 (g/kg) and the rate of flow before the layer of grain to v_2 and after v_3 (m/s) for different humidity savagefang grain W_{id} (%) and initial temperature , (°C), and the thickness of the stationary layer of grain. Further results are shown for the thickness of the layer of the grain $h = 0,25$ m. The moisture content of the working gas (d_2 , g/kg.n.) asked for the boundary conditions, interphase Teploobmen. That is set on 20...30 % more from the actual production practice, the values for mine

promotechyna dryers in summer. Increasing the moisture content of gases from 6...10 g/kg.p (gases before drying) to the moisture content limit at the temperature $t_2=22...28$ °C ($d_2= 20.5...22.5$ g/kg.p), the speed of heating the layer of wheat grain ($h = 0.25$ m), respectively, were grown in 8...11 times and amounted to $d\theta/d\tau = 4,5...6,5$ (°C/min). Large values of the speed of heating of the grain must be consistent with the greater difference of temperature of phase environments and higher speed gas flow.

It is obvious that the penetration of the working gases bullet grain through them is reduced and increases the likelihood pyrocondensate on the surface of these distant layers of the grain. To counter this, we have also introduced an additional mechanism to prevent condensation of moisture on the surface remote of the grain layers with the increase of the cooled working gas flow rate of these gases and changing the pressure gradient. The variables humidity heated in teploobmenu camera grain (WG) established by the volume of condensate $\delta W_{\text{конд}}$ ($WP = W_0 + \delta W_{\text{конд}}$) and were compared with those obtained in a standard way in the airing cupboard. The amount of condensate $\delta W_{\text{конд}}$ established for the product of the difference of moisture content of gases before and after the layer of grain ($DT, D2$) at the expense of the working gas L:

$$(\delta W_{\text{конд}} = L \cdot (d_1 - d_2) / 1000), \quad (3)$$

The current temperature of the layer of grain was determined according to the indications of temperature sensors placed in the layer of grain. In Fig. 1 shows the dynamics of the temperature of the grain of wheat when mitasova interaction with the warm gases of high humidity ($\varphi_2 \approx 97...99$ % and

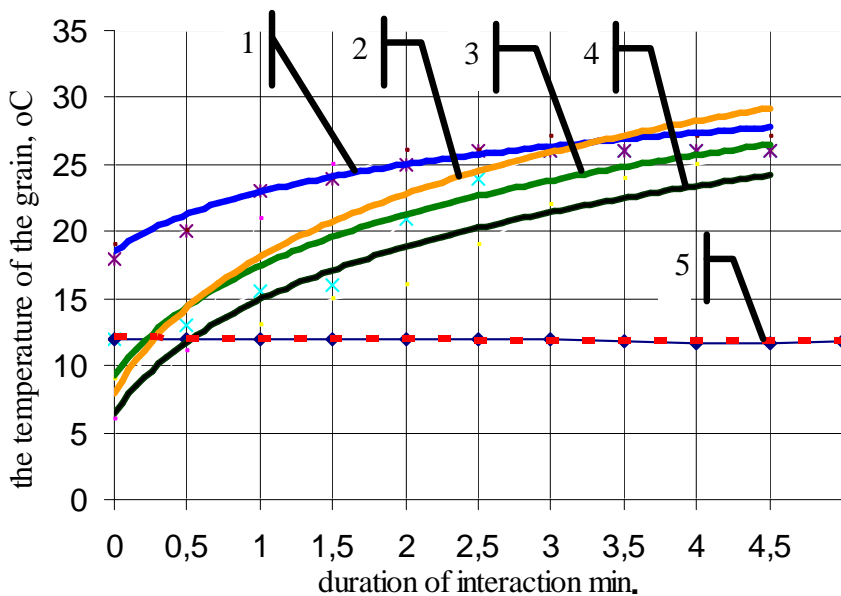


Fig.1 –Dynamics of temperature of barley grain for different initial moisture content (W_0) and temperature (θ_0): 1 – $W_0=25$ %, $\theta_0=19$ °C; 2 – $W_0=20$ %, $\theta_0=12$ °C; 3 – $W_0=25$ %, $\theta_0=9$ °C; – $W_0=13$ %, $\theta_0=9$ °C; 3 – $W_0=21$ %, $\theta_0=12$ °C.

$d_1=20...21$ g/m³, $t_2= 26...28$ °C). The resulting dynamics of the calculated and actual grain moisture wheat at mitasova interaction with the excessively humidified gases allowed to confirm the possibility of reducing the moisture of the layer of grain 2 – 6% in comparison with the calculated data due to the established modes of heat transfer . As a final assessment of the feasibility of retrofitting technology (process) is the economic feasibility [2], so the

following is the calculation of return this method of heating the wet spent grain drying gases.

For the summer period of operation of dryers is characterized by such exhaust gas parameters: temperature $t_2 \leq 50$ °C, humidity $\varphi_2 \approx 90\%$ of the upper drying zones and $\varphi_2 \approx 55\%$ lower [4]. Taking into account the design features of the mine dryers and gas pipelines from supply of waste gases for re-use of heat, loss of heat through the heating surfaces of pipelines and heat exchange chamber can be between 7% [3] to 15% [1, 2, 4]. The temperature of the grain harvested during the day can vary in a wide range of $\theta_0 = 5 - 20$ °C and the humidity $W_0 = 15 - 30$ %. It is obvious that the heating of wet grain exhaust gases, its temperature cannot exceed the temperature of the coolant ($\theta_1 \leq t_2$, $\theta_1 \approx 28$ °C) and grain moisture for the worst conditions phase-to-phase interaction can be moistened. at $\delta W = 0,5 - 1,5$ %. To spend $Q_{\delta\theta}$ of heat for heating the grain to a temperature of exhaust gas calculated by the known formula [1, 2]:

$$Q_{\delta\theta} = G \cdot c_0 \cdot (\theta_1 - \theta_0), \quad (4)$$

where G is the grain mass, kg; c_0 is the specific heat of grain with humidity W_0 , kJ/(kg•K); θ_0 and θ_1 – the final and initial grain temperature, °C.

Cost of heat of dehydration of extra grain moisture (condensate) that can get into it from the exhaust gases can be calculated by the known formula [1, 2]:

$$Q_{\delta W} = \delta W \cdot (r + \Delta r), \quad (5)$$

where r is the latent heat of vaporization at temperature θ_1 of the grain, kJ/chgvol.; Δr is the specific heat in overcoming the internal resistance to diffusion of moisture, kJ/chgvol., δW – the value of moisture condensation on the surface of the grain, kg. According to estimates of the method of heating of

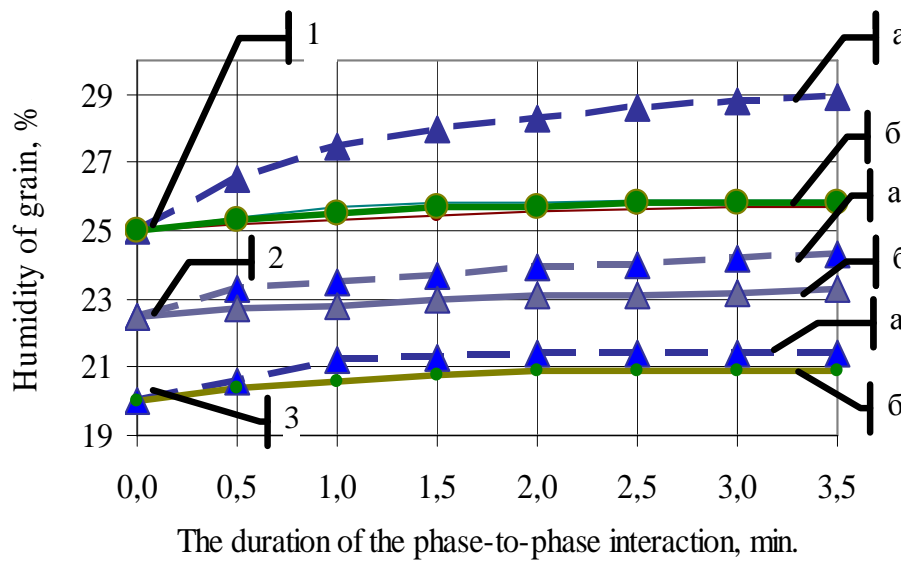


Fig.2 – the Dynamics of humidity of wheat grain a) calculated and b) – actual: 1 – $\theta = 6$ °C, $W = 20\%$; 2 – $\theta = 10$ °C, $W = 22,5\%$; 3 – $\theta = 11$ °C, $W = 25\%$.

the grain of wheat relative humidity $W_0 = 17.5 - 20$ % and temperature $\theta_0 = 16 - 17$ °C exhaust drying gases moisture $d_2 = 20.5$ and 22.5 g/m³ and $t_2 = 28$ °C, saving of heat is:

$$\delta Q = Q_{\delta\theta} - Q_{\delta W} = 13 \dots 20 \text{ (kJ/kg of grain)}.$$

Or in terms of natural gas for heating one ton of grain, the saving of heat is $0.45 - 0.66$ (m³/tone).

In addition, the following should be noted the technological advantages of pre-heating as a tenfold increase in the rate of heating the wet layer of the grain before it is dehydrated. This will allow

not only to accelerate internal capillary diffusion of moisture and leveling layer in the body of the grain of heterogeneity of moisture content, but also to reduce the risk of lamellar grain overheating of heat-labile components. The calculations of the experimental studies prove that under these conditions phase-to-phase interaction (the rate of flow of working gases, as the mobility of the grain layer and the temperature difference t_2 gas and grain temperature θ_0) the temperature of the layer of grains more than ten times faster is equated with the temperature of the working gases (for 3...8 min) compared to the heating of the grain dry gases.

Conclusions: 1. With the exhausted drying gases lost 40...60 % of the heat most dryers domestic production and 25...45 % - modern designs of foreign production;

2. The heat from exhaust drying gas can be heated almost twice the grain supplied to the grain dryer;

3. The rate of heating of wet grain spent drying gases ($d\theta/d\tau = 9 - 18$ °C/min) up to ten times more heat from dry gases and duration of heating to the temperature of these gases is 2...5 min.;

4. The specified phase-to-phase modes of interaction (speed of the flow condition and the mobility of the layer of the grain) can significantly reduce the risk of condensation condensed moisture on the surface layer of the grain;

5. In the testing conditions proved a technological possibility and expediency of use of heat of exhaust drying gas with maximum relative humidity ($\phi_2 \approx 97...99$ %) for pre-heating of wet grain before it is dehydrated and tested method and technological modes in which slavojova grain is almost ten times faster than it is heated and slightly moistened;

6. Re-use of heat of the exhaust drying gas to heat the layer of the grain before it is dehydrated it is possible to reduce the unit costs of drying in terms of natural gas-...0,45 0,66 m³/t.

Literature:

1. Flaumenbaum, B. L. Fundamentals of food preservation / B. L. Flaumenbaum, S. S. Tanchev, M. A. Grishin // M: Agropromizdat., – 1986. – 494 s
 2. Ostapchuk N. In. Scientific principles of grain storage processes // Scientific works ONAFT, vol. 29. vol. 2. – P. 58-62.
 3. Gaponyuk. The influence of environmental parameters on grain drying // Ukrainian Food Journal. – K. 2013 - Volume 2, Issue 3 – Pp. 337-346.
 4. Gaponyuk I. And. Domestic dryers: status and prospects // Storage and processing of grain. – 2014. – № 2 (179) – p. 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

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

