

УДК 664.72.047,54:005.591.6

Гапонюк І.І., доктор техн. наук, проф. НУХТ

## ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ РЕКУПЕРАЦІЇ ТЕПЛОТИ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ

*Анотація: виконано аналіз втрат теплоти з відпрацьованими газами сушильних та охолоджувальних зон шахтної сушарки зерна та розглянуто прикладну особливість використання різних способів рекуперації теплоти різних за вмістом вологи газів. Теоретично обґрунтовано техніко-технологічну можливість та економічну доцільність нового способу використання теплоти відпрацьованих робочих газів підвищеного вологовмісту для нагрівання зневоджувальних тіл перед їх сушінням. В стендових умовах встановлено кінетику міжфазового тепло- і вологообміну нерухомого шару зерна за різних параметрів відпрацьованих робочих газів перших сушильних зон  $t_2$ ,  $d_2$ ,  $\varphi_2$  та перемінної фіктивної швидкості їх течії  $v_{\phi}$ . Отримано напівемпіричні рівняння міжфазового теплообміну за різних градієнтів вологи й різниці температур фазових середовищ та обґрунтовано режими нагрівання малорухомого шару зерна для умов однакових градієнтів температури й вологи. Отримані результати досліджень дозволяють зменшити питомі витрати теплоти сушіння на 15-20%, інтенсифікувати процес зневоднення у 8-10 разів та покращити однорідність сушіння зерна. Отриманий спосіб нагрівання нерухомого шару зерна відпрацьованими газами підвищеного вологовмісту не потребує складних конструкцій для реалізації.*

**Ключові слова:** *теплота, рекуперація, градієнт, зерно, теплообмін.*

**Вступ.** Попри багатовікову практику та значний вклад науковців в теорію сушіння, досі ще в структурі енерговитрат вирощування та переробки зерна найбільша її частка припадає на зневоднення. За різними даними в структурі агротехнологічного циклу вирощування та приведення в стійкий стан зберігання зерна, енерговитрати на його сушіння складають 50...70 %, а в структурі енерговитрат його післязбиральної обробки – 85 – 90 % (Рис. 1). В порівнянні із енерговитратами тех.

нологій сортових помелів пшениці, витрати енергії на сушіння однієї планової тони зерна є співставивими із витратами на виробництво близько 1,6...1,8 т сортового борошна.

**Мета досліджень.** Зменшення питомих енерговитрат зневоднення капілярно-пористих колоїдних тіл.

**Матеріали та методи.** За найбільш поширеного у світовій та вітчизняній практиці конвективного способу зневоднення зерна найбільша частка витрат і втрат теплоти припадає на втрати із відпрацьованим сушильним агентом (рис.1). Якщо для фазових перетворень вологи в зерні потреба розрахунково-необхідної енергії становить близько 144 МДж/1пл.т, то решта енерговитрат зерносушарок, а це близько 180 МДж/1пл.т або 56 % загальних витрат теплоти сушіння, припадає на втрати із відпрацьованими робочими газами (рис.1) [1 – 3]. Тобто фактичні витрати теплоти сушіння зерна більш як удвічі перевищують теоретичні (роз-

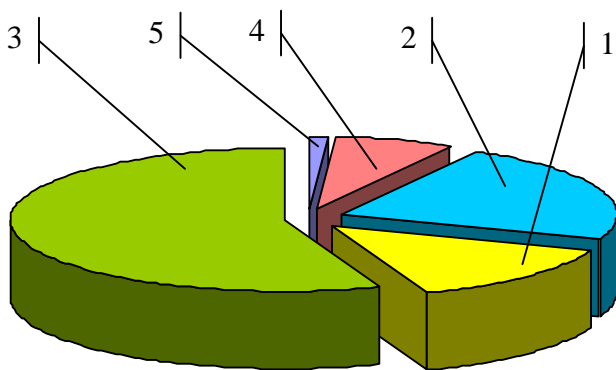


Рис. 1 – Структура енерговитрат сушіння зерна кукурудзи шахтними сушарками: 1 – витрати теплоти сушіння зерна; 2 – втрати теплоти на нагрівання зерна; 3 – втрати теплоти з відпрацьованими газами без охолоджуючих газів; 4 – втрати теплоти через поверхні корпусу сушарки, 5 – втрати теплоти недоспалювання теплоносія

на 6 % за одну годину в найбільш розповсюдженій конструкції зерносушарки шахтного типу. Очевидно, що із збільшенням швидкості сушіння ці втрати пропорційно зростатимуть, а при уповільненні – зменшуватимуться [1, 2, 6]. Однак оскільки уповільнені способи зневоднення не задовольняють вимог своєчасного сушіння

(розрахункові) витрати з його зневоднення. Ці так називаємі технологічні втрати пов'язані із особливістю форм зв'язку вологи з тілом зернини й недосконалістю технології сушіння [3 – 5]. Наведені втрати теплоти в перерахунку на весь зібраний урожай вітчизняними господарствами можуть перевищувати 1 млн.т умовного палива на рік [2, 3].

Відмічені вище втрати теплоти наведено для швидкості конвективного сушіння однієї тони вологого зерна

всього зібраного урожаю, тому на практиці їх розглядають як допоміжні. І основну частку зерна зібраного урожаю, як у вітчизняній так і закордонній практиці, сушать швидкісними способами й усвідомлено йдуть на додаткові втрати енергії [4, 6].

Із різноманітних способів зменшення втрат теплоти зневоднення капілярно-пористих тіл, до яких відносяться зерно й продукти його переробки, відносять рекуперацію теплоти відпрацьованого сушильного агенту [1 – 3, 6, 7]. В даній роботі ми хочемо доповнити відомі рішення з рекуперації теплоти та поділитися нашими результатами досліджень з можливості рекуперації теплоти відпрацьованого сушильного агенту будь-якого вологовмісту в поєднанні із збільшенням швидкості перебігу вологообміну прискоренням внутрішньо-капілярної дифузії вологи в тілі зернини. Слід зауважити, що у вітчизняній та закордонній зерносушильній практиці найбільшого розповсюдження отримали лише способи рекуперації теплоти мало зволжених відпрацьованих газів після зони охолодження висушеного зерна. Тобто газів довіклля, що нагріваються до температури висушеного зерна в охолоджувальній зоні тепловологообмінної камери сушарки. Відносна вологість таких газів не перевищує 30 %, а вологовміст – 18 г/кг<sub>с.п.</sub>(дивись нижче). Проте основна частка втрат теплоти припадає якраз на високо зволожені відпрацьовані газі сушильних зон сушарки (рис.1).

Виконавши розрахунок кількості теплоти, що втрачається із відпрацьованими газами за відомою формулою 1 та перерахувавши ці втрати на кількість енергоносіїв за їх теплоутворюючою спроможністю за форм.2, ми можемо встановити розмір цих втрат у вартісному вираженні за форм.3.

$$Q_{em.a} = L[1,004 (t_2 - t_0) + 2,5 (d_1 - d_0)/1000 + (1,842/1000) (d_1 t_2 - d_0 t_0)], \quad (1)$$

де  $L$  — витрати агенту сушіння, кг/год;  $t_0$  і  $t_2$  — температура повітря навколишнього середовища та відпрацьованого агенту сушіння, °C;

$d_0$  і  $d_1$  — вологовміст повітря навколишнього середовища та відпрацьованого агенту сушіння, г/кг<sub>с.п.</sub>

$$m = Q_{em.a} / q, \quad (2)$$

де  $q$  - теплоутворююча спроможність теплоносія, МДж/кг (МДж/м<sup>3</sup>)

$$B = m \cdot \psi \quad (3)$$

де  $c$  - ціна теплоносія, грн/кг (грн/м<sup>3</sup>).

Підставивши відповідні значення у формули 1 – 3 для роботи зерносушарок вітчизняного виробництва ДСП-32х2от та імпортних високопродуктивних (типу ТОРНУМ) для літнього й осіннього періодів сушіння із використанням теплоти дизельного палива (вартістю 23 грн/кг) та природного газу (вартістю 7,1 грн/м<sup>3</sup>) отримуємо орієнтовні втрати теплоти із відпрацьованими газами за годину роботи сушарок та за добу (20,5год/доб) у фізичних одиницях та грошовому вираженні (табл.1)

Аналізуючи наведені в табл..1 дані можемо відмітити, що в холодніший період роботи сушарки (осінню пору року) втрати теплоти є більшими за рахунок більшої різниці температур відпрацьованих газів і довкілля ( $t_2$  і  $t_0$ ) та більшої різниці вологовмісту відпрацьованих газів та довкілля ( $d_2$  і  $d_0$ ).

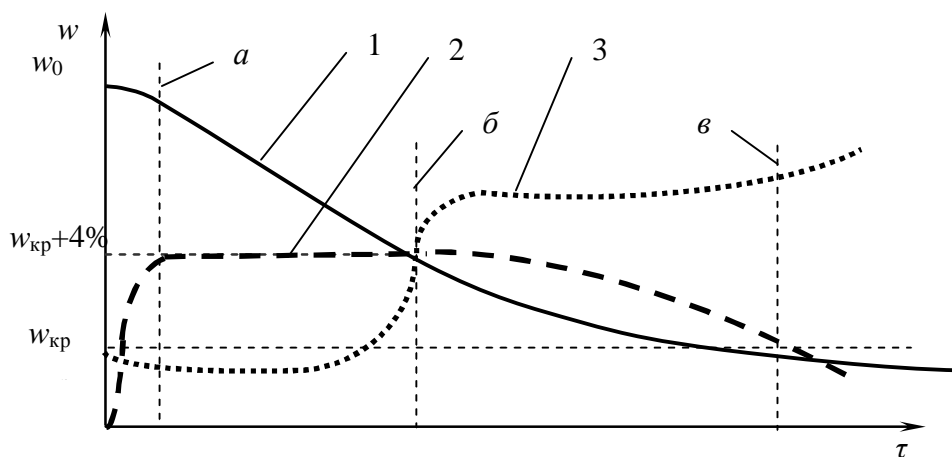
**Таблиця – Техніко-економічні показники відпрацьованих газів сушарки**

Сезон роботи	Сушарки	Кількість віпр. газів	Теплота	В перерахунку на дизельне паливо				В перерахунку на природний газ			
				тис.м <sup>3</sup> /г	ГДж/г	кг/г	т.кг/доб	т.грн./г	т.грн/доб	м <sup>3</sup> /г	т. м <sup>3</sup> /доб
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
літо	вітчиз	340	11,6	275	6	6,3	129,8	362	7	2,6	52,6
	закор	480	16,3	389	8	8,9	183,3	510	10	3,6	74,3
осін ь	вітчиз	340	15,8	377	8	8,7	177,5	494	10	3,5	72,0
	закор	480	22,3	532	11	12,2	250,6	698	14	5,0	101,6

Значимість втрат в ціновому вираженні від 50 т.грн за добу роботи одного спареного зерносушильного комплексу ДСП-32х2от доводять значну економічну доцільність заходів з утилізації їх теплоти.

**Результати досліджень.** Із відпрацьованих робочих газів найбільш придатними по вологовмісту для використання в тепло-вологообмінних камерах, як уже

вище відмічалось, є гази після зони охолодження сухого зерна. Їх вологовміст для роботи сушарок в різні пори року коливається в межах лише 8 – 18 г/кг<sub>с.п.</sub> Частка таких газів в сушарках різних конструкцій 26 – 32 % від загальної кількості відпрацьованих газів, а частка втрат теплоти з ними ще менша – 22 – 25 % від втрат із всіма відпрацьованими газами сушильних та охолоджувальної зони тепловологообмінної камери сушарки. Проте якщо вологовміст відпрацьованих робочих газів після зони охолодження лише в межах 8 – 18 г/кг<sub>с.п.</sub>, а їх відносна вологість до 30 %, то після сушильних зон вологовміст втричі більший і становить 35 – 45 г/кг<sub>с.п.</sub>. Велика абсолютна вологість відпрацьованих робочих газів після сушильних зон сушарки, попри їх кількакратно більшу теплоту порівняно із відпрацьованими газами холодної зони сушарки, обмежує їх практичне використання. Відомі наукові рішення інституту теплофізики НАНУ (проф. Снежкін Ю.Ф.), ОНАХТ (професорів Остапчука М.В., Бурдо О.Г., Гришкіна М.А.), ХДУХТ (проф. Погожих М.І.) з використання різноманітних теплообмінників й теплових насосів на жаль на сьогодні ще не знайшли свого широкого практичного використання із-за складності їх конструкції й значної вартості виготовлення й обслуговування. З цієї причини питання використання теплоти відпрацьованих газів підвищеного вологовмісту для високопродуктивних зерносушильних агрегатів досі ще не вирішено. Сподіваємося, що наведені нижче наші результати досліджень дозволять певною мірою наблизити практичне



*Періоди стрімкого зростання швидкості сушіння (0–а), сталої швидкості сушіння (а – б) та спадної швидкості сушіння (б –в)*

**Рис. 2 – Крива конвективного сушіння (1), швидкості сушіння (2) та нагрівання шару зневоджуваних тіл (3)**

вирішення вказаної проблеми використання теплоти відпрацьованих газів підвищеного вологовмісту.

На рис.2 нами представлено кінетику конвективного сушіння малорухомого шару

зерна в шахтній зерносушарці. Хотілось би звернути увагу на кінетику температури шару зерна (крива 3 рис.2). На початковому етапі зневоднення робочими газами температурою від 100 °С ми можемо спостерігати не зростання, а навіть деяке зниження температури зневоджуваних тіл (період *a*) – *б*) рис.2), що пов'язано із втратами енергії фазового перетворення вологи в периферійних шарах цих тіл. За виробничими дослідженнями сушіння зерна різних за розмірами зернин та вмісту вологи, період не зростаючої температури зерна може становити від 15 хв, дрібнозернистих в літню пору року, до 80хв - крупнозернистих пізно-осінню.

Проведені нами дослідження зневоднення зерна в шахтних зерносушарках вітчизняного та закордонного виробництва дозволили встановити тісну залежність параметрів фазових середовищ і втрат теплоти із цими газами від режимів сушіння, виду зневоджуваної культури та параметрів доквілля або сезону роботи сушарки. На нашу думку представляє науково-прикладний інтерес різноманітні виробничі дослідження параметрів відпрацьованих робочих газів шахтних зерносушарок для узагальнення цих різноманітних даних та встановлення технологічної можливості та економічної доцільності рекуперації їх теплоти різних зернових культур, пор року та конструкцій зерносушарок.

#### **Висновки:**

1. Витрати теплоти сушіння зерна в зерносушильних агрегатах вітчизняного та закордонного виробництва перевищують розрахунково-необхідні з фазових перетворень вологи в 1,5 – 3,5 разів;
2. Найбільша частка втрат теплоти зерносушильних агрегатів припадає на втрати з відпрацьованими робочими газами і можуть перевищувати витрати енергії фазових перетворень вологи;
3. Для найбільш поширених вітчизняних зерносушарок ДСП-32от втрати теплоти за годину роботи сушарки можуть становити від 11,6 ГДж, а потужних закордонних – 22,3 ГДж, що в перерахунку на вартість природного палива становить 52,6 та 101,6 тис.грн. відповідно за одну добу роботи цих сушарок;

4. Високий вологовміст відпрацьованих робочих газів ( $d_2 = 25...45 \text{ г/м}^3$ ) обмежує технологічну доцільність їх використання без спеціальної підготовки та потребує складних конструкцій з їх використання;

5. За існуючих режимів сушіння в шахтних зерносушарках температура нерухомого шару зневоджуваного зерна на початковому етапі зневоднення може не підвищуватися і навіть дещо понижуватися за умов перевищення втрат теплоти фазових перетворень вологи поверхні тіла зернини над кількістю підведеної енергії зневоджуваними газами.

6. На тривалість періоду відсутності нагрівання шару зневоджуваних тіл впливають розміри цих зневоджуваних тіл, початковий вологовміст та кількість підведеної теплоти (температура та швидкість робочих газів) і може коливатися від 15 до 90 хв для шару ріпаку та кукурудзи відповідно.

7. Експериментально доведено можливість використання теплоти відпрацьованих робочих газів з граничною відносною вологістю ( $\varphi_2 \approx 97...99 \%$ ) та технологічний спосіб і режими міжфазового тепло-вологообміну, за яких технологічно доцільно нагрівати вологе зерно перед його зневодненням;

8. Теоретично обґрунтовано технологічну можливість міжфазового теплообміну шару зерна із відпрацьованими робочими газами зерносушільних 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 – Одеса: 2006.- вип. 29. т.2. – С. 58–62.
3. Гапонюк І.І. Вплив параметрів довкілля на сушіння зерна // Ukrainian Food Journal. – К.-2013 - Volume 2, Issue 3 – С.337-346.
4. Свідерська О. І. Сучасні методи й обладнання для зневоднення пивної дробини механічним шляхом / О. І. Свідерська, В. Л. Яровий // Харч. пром-сть. - 2010. - № 9. - С. 141-143.

5. Палаш А. А. Термодинаміка і масообмін в процесах аерації рідинних середовищ / А. А. Палаш, С. А. Бут, В. М. Таран // Харч. пром-сть.- 2009.- № 8. - С. 45-47

6. 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

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

## **ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ ОТРАБОТАННЫХ ГАЗОВ**

Аннотация: выполнен анализ способов рекуперации теплоты и обоснована возможность использования теплоты отработанных рабочих газов повышенного влагосодержания для нагрева зневоджувальних тел перед их сушкой. Получено напів-ем-эмпирические уравнение межфазового теплообмена при различных градиентах влаги и разницы температур фазовых сред и обоснованы режимы нагрева малору-хомого слоя зерна для условий одинаковых градиентов температуры и влаги.

**Ключевые слова:** теплота, рекуперация, градиент, зерно, теплообмен.

## **INTENSIFICATION OF HEATING OF GRAIN IS IN DRYER BY GASES WITH ENHANCEABLE MAINTENANCE OF MOISTURE**

Abstract: The analysis of the heat losses with exhaust gases of the drying and cooling zones of a shaft grain dryers and studies applied feature of the use of different methods of heat recovery of the different content in the logs of gases. Theoretically proved the technical and economical feasibility of a new method of using heat of the exhaust working gas of high moisture content to heat spoguleni bodies before drying them. The obtained semiempirical equation of interfacial heat transfer for different gradients of moisture and temperature differences of phase environments and justifies the heating operation is slow-moving layer of grain for the same conditions of temperature gradients and moisture. The results obtained will allow to reduce specific

heat consumption of drying by 15-20%, to intensify the process of dehydration 8-10 times and improve uniformity of drying of grain. The resulting method of heating the fixed bed of grain, exhaust gases of high moisture content does not require complicated structures to implement.

**Key words:** grain, drying, warmth, economy.

*Одержана редколегією 31 жовтня 2016 р.*