

ОСОБЛИВОСТІ ТЕПЛОВОЛОГООБМІНУ НЕРУХОМОГО ШАРУ ЗЕРНА ПШЕНИЦІ ІЗ РОБОЧИМИ ГАЗАМИ ПІДВИЩЕНОГО ВОЛОГОВМІСТУ

Гапонюк І.І., к.т.н., доц.

(Національний університет харчових технологій)

Виконано аналіз параметрів відпрацьованих робочих газів зерносушильних агрегатів та економічної доцільності використання їх теплоти для повторного використання, досліджено особливості використання теплоти відпрацьованих робочих газів різного вологовмісту, теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено умови міжфазової взаємодії нерухомого шару зерна від параметрів відпрацьованих газів за яких критерій Кірпічова набуває найменших, а Нусельта найбільших значень.

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 сушильним та охолоджувальній зонам сушарки (t_2 , d_2 , v_2) та виконано порівняння цих значень із розрахунковим даними [1, 6]. Якщо невисокий вологовміст відпрацьованих газів після зони охолодження ($d_2 < 15$ г/м³) 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 рекуперацію теплоти цих газів без їх зневоднення [1, 5, 6] або використання в складних теплоутилізуючих пристроях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В ряді публікацій наведено розрахунок вологоємнісного балансу робочих газів за умов повернення відпрацьованих робочих газів в сушильні зони або топкове відділення [1, 4, 5]. За цими розрахунками починаючи із 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 [1, 6]. 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 ($dW/d\tau$) від його температури ($d\theta$), нами було виконані 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 переміщається під дією градієнту 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 на дифузії вологи відіграють енергетичні стани цієї вологи поверхневих шарів [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 дослідження на стендовій установці зображеній на рис.1.

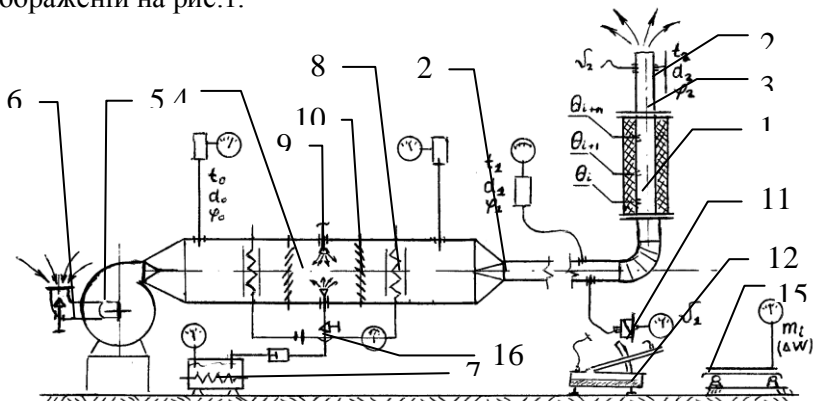


Рис.1. Стендова установка з дослідження тепломасообміну із газами різного вологовмісту: 1 – капсула із зерном; 2 – підвідний і 3 –

відвідний газопроводи; 4– зволожувальна камера; 5 – вентилятор; 6 – регулятор продуктивності течії газів; 7 – регулятор температури вологи; 8–регулятор температури газів; 9–форсунки; 10–відображувальні екрани; 11– дифтягомір; 12–мікро-манометр; 13– термомари; 14– вимірювач вологовмісту та температури газів; 15–ваги електронні; 16 – вентиль.

При виконанні досліджень виконували заміри:

параметрів доквілля – температуру t_0 (°C) та вологовміст d_0 (г/кг);

параметрів 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 (°C) і W_i (%).

Кінетику тепловологообміну встановлювали для зразків зерна пшениці продовольчої 4 кл, урожаю 2008 р, об'ємної ваги 797 г/л, із вмістом смітної домішки – 0,42%, вмістом сирії клейковини – 19,6 %, якість клейковини по ІДК 95 група якості – 11.

Вологовміст та температура повітря доквілля впродовж досліджень змінювались не суттєво і становили $t_0 \approx 18$ °C та $d_0 \approx 8,5$ г/м³.

Вологовміст відпрацьованих робочих газів d_2 (г/кг) приймали для гірших умов міжфазового тепловологообміну, тобто перевищення їх вологонасиченості на 30% та пониженої температури на 10 – 15 °C від фактичних для шахтних прямотечійних зерношарок.

Результати представлено в табл.1 для зразків зерна пшениці.

За змінних параметрів робочих газів (t_2 , d_2), швидкість нагрівання зерна пшениці коливалась в діапазоні $d\theta/d\tau = 4,5 - 6,5$ (°C/хв.). Більші значення швидкості нагрівання зерна відповідають умовам більшої різниці температури фазових середовищ та швидкості течії газів.

При міжфазовому теплообміні гази охолоджуються, а зерно нагрівається. Із охолодженням газів зменшується їх вологопоглинаюча спроможність, що за певних обставин (перевищення повного насичення вологою газів, тобто $\phi \geq 100$ %) може спричиняти конденсацію вологи на поверхню шарів зерна.

Оскільки в наведених дослідженнях вологість газів становила $\phi \approx 100$ %, 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 по величині конденсату $\delta W_{\text{конд}}$ ($W_p = W_0 + \delta W_{\text{конд}}$). Величину конденсату $\delta W_{\text{конд}}$ встановлювали по добутку різниці вологовмісту газів при їх температурі до шару зерна t_2 (d_t) та середнього шару зерна θ_i на продуктивність газів L ($\text{м}^3/\text{хв}$):

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

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 $\delta W_{\text{конд}}^{\text{енс}}$ ($W_2 = \delta W_{\text{сорб}} + \delta W_{\text{конд}}^{\text{енс}}$). По показникам вологовмісту газів (d_t), 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 $\delta W_{\text{конд}}^{\text{енс}}$ (табл.1). А із збільшенням швидкості течії робочих газів кінцева вологість зерна порівняно із розрахунковими значеннями зменшувалась.

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

Із представлених на рис.4 динаміки розрахункової (а) та фактичної (б) вологості зерна пшениці 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 пшениці 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%.

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

Таблиця 1

Вплив параметрів газів на тепловологообмінні процеси зерна пшениці

Тривалість взаємодії, t , хв.	Параметри газів				Параметри зерна					Баланс теплоти, кДж/кг:		
	t_2 , °C	d_{z2} , г/м ³	φ_{z2} , %	v_{z2} , м/с	$\theta_{\text{серед-шару}}$	$\delta\theta$	$W_{\text{факт}}$	$\delta W_{\text{факт}}$	$W_{\text{розр}}$	$\delta Q_{\text{нагр}}$ нагрівання зерна	$\delta Q_{\text{суш}}$ сушіння зерна	$\delta Q = \delta Q_{\text{нагр}} - \delta Q_{\text{суш}}$
0	28	22,5	100	1,7	6	0	20	0	20	74,8	24,9	50
1	28	22,5	100	1,7	23	17	20,6	0,6	21,2			
2	28	22,5	100	1,7	27	21	20,9	0,9	21,4			
3	28	22,5	100	1,7	28	22	21,0	1,0	21,4			
5	28	22,5	100	1,7	28	22	21,0	1,0	21,4			
0	26	20,5	100	1,7	10	0	22,5	0	22,5	47,6	20,0	27,6
1	26	20,5	100	1,7	16	6	22,8	0,3	23,0			
2	26	20,5	100	1,7	21	11	23,1	0,6	23,2			
3	26	20,5	100	1,7	24	14	23,2	0,7	23,5			
4	26	20,5	100	1,7	24	14	23,3	0,8	23,6			
0	27	21	100	4,3	11	0	22,5	0	22,5	54,4	25,2	29
1	27	21	100	4,3	23	12	22,9	0,4	24,8			
3	27	21	100	4,3	25	14	23,2	0,7	26,0			
5	27	21	100	4,3	27	16	23,4	0,9	26,7			
7	--	--	--	--	27	16	23,5	1,0	--			
0	28	22	100	4,3	11	0	25	0	25	40,8	20,1	21
1	28	22	100	4,3	23	12	25,3	0,3	27,5			
2	28	22	100	4,3	25	14	25,6	0,6	28,3			
3	28	22	100	4,3	27	16	25,7	0,7	28,8			
4	28	22	100	4,3	28	17	25,7	0,7	29,0			
6	--	--	--	--	28	17	25,8	0,8	--			
0	28	22,5	100	4,3	17	0	17,5	0	17,5	34,0	12,2	22
2	28	22,5	100	4,3	26	9	17,8	0,3	21,0			
5	28	22,5	100	4,3	27,5	10,5	17,9	0,4	22,1			
8	28	22,5	100	4,3	28	11	18,0	0,5	22,7			

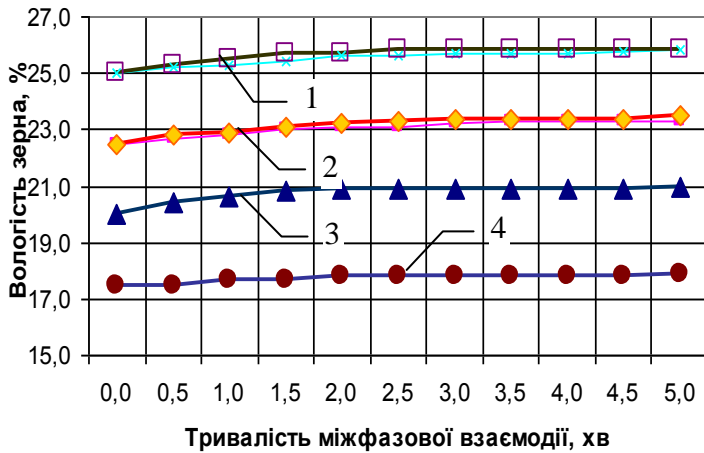


Рис. 2. Динаміка вологи зерна пшениці різної температури при міжфазовій взаємодії: 1– $\theta=6^{\circ}\text{C}$; 2– $\theta=11^{\circ}\text{C}$; 3– $\theta=11^{\circ}\text{C}$; 4– $\theta=15^{\circ}\text{C}$

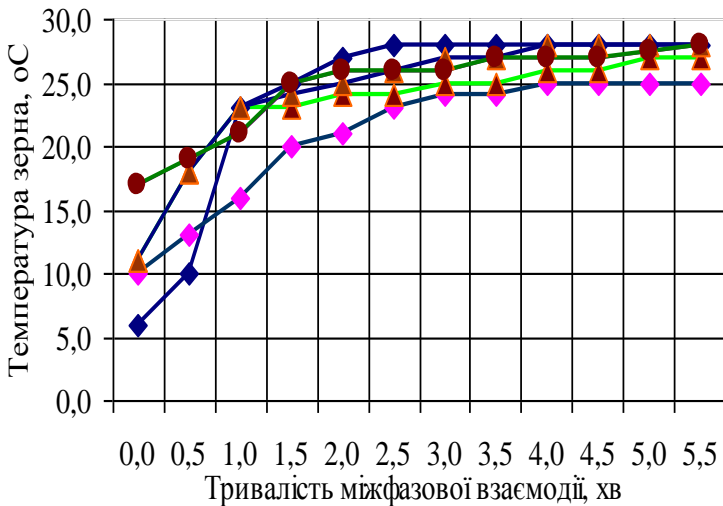


Рис. 3. Динаміка температури зерна пшениці різної вологості при міжфазовій взаємодії: 1– $W=17,5\%$; 2– $W=25\%$; 3– $W=25\%$; 4– $W=22,5\%$; 5– $W=20\%$

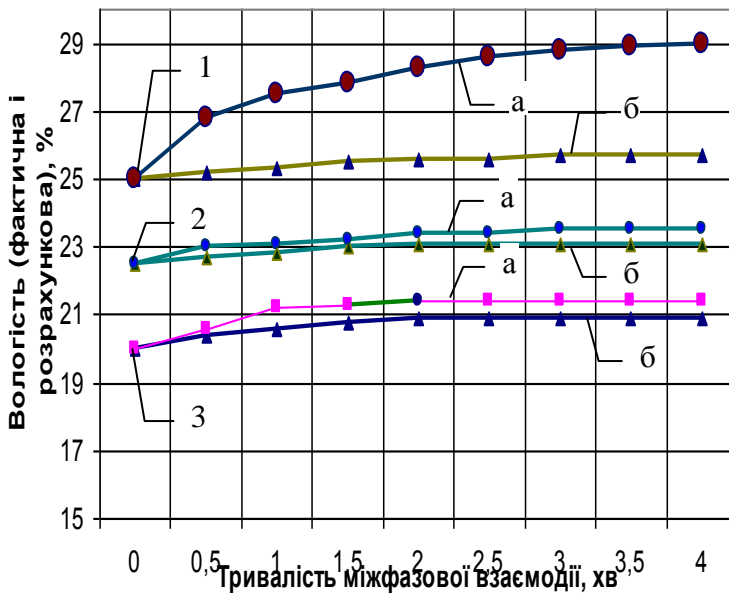


Рис. 4. Динаміка а) розрахункової та б) фактичної вологості зерна пшениці міжфазової взаємодії: 1 – $\theta = 6^\circ\text{C}$, $W = 20\%$; 2 – $\theta = 10^\circ\text{C}$, $W = 22,5\%$; 3 – $\theta = 11^\circ\text{C}$, $W = 25\%$

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, 6]. Для наведених розрахунків економічної доцільності використання теплоти цих газів прийемо найбільші втрати теплоти, а температуру відпрацьованих газів найменшою, з урахуванням чого розрахункова температура перед шаром зерна буде становити: $t_2 = 26 - 28^\circ\text{C}$. Відносну вологість відпрацьованих газів φ_2 , з урахуванням найінтенсивнішого вологообміну та зменшення їх температури при транспортуванні, прийемо $\varphi_2 \approx 100\%$, із відповідним вологовмістом $d_2 = 20 - 21 \text{ г/м}^3$.

Температура зерна ранніх зернових 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 $\delta W = 0,5 - 1,5 \%$ (табл. 1).

Для нагрівання зерна до температури відпрацьованих газів необхідно витратити теплоту $Q_{\delta\theta}$, яку можна розрахувати за 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, °С.

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

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

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 висушування вологи із зерна, кг.

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

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 θ_0), температура шару зерна відносно швидко зрівнюється із температурою робочих газів (впродовж 5 – 8 хв), а економія теплоти нагрівання зерна $Q_{\delta\theta}$ перевищать додаткові витрати теплоти на зневоднення сорбованої зерном вологи $Q_{\delta W}$.

Для конвективного способу підігрівання зерна пшениці вологістю $W_0 = 17,5 - 20\%$ і температурою $\theta_0 = 6 - 17$ °С робочими газами вологовмістом $d_2 = 20,5 - 22,5$ г/м³ і температурою $t_2 = 28$ °С, економія теплоти становить: $\delta Q = Q_{\delta\theta} - Q_{\delta W} = 22 - 50$ (кДж/кг_{зерна}).

Із підвищенням вологості зерна (W_0) та зростанням температури (t_2) і швидкості течії відпрацьованих газів (v_2) економія теплоти δQ буде збільшуватися.

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 критерій Кірпічова (Ki) набуває мінімальних значень, а критерій Нусельта (Nu) – максимальних;

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

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

Список літератури

1. Гапонюк О.І. Активне вентилявання та сушіння зерна /Навчальний посібник / О.І Гапонюк, М.В. Остапчук, Г.М. Станкевич, І.І. Гапонюк // К.:324с з табл.

2. Лыков А.В. Теплообмен (Справочник)// – М.: Энергия. 1972. – 560 с.

3. Малин Н.И. Энергосберегающая сушка зерна// – М.: КолоСС, 2004. – 240 с.

4. Флауменбаум Б.Л. Основы консервирования пищевых продуктов / Б.Л. Флауменбаум, С.С. Танчев, М.А.Гришин // М.: Агропромиздат., – 1986. – 494 с.

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

6. Гапонюк І.І. Удосконалення технології сушіння зерна. [Монографія] – Одеса.: Поліграф, 2009. – 182 с.

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВЛАГООБМЕНА НЕПОДВИЖНОГО ШАРУ ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ ИЗ РАБОЧИМИ ГАЗАМИ ПОВЫШЕННОГО ВЛАГОВМЕСТИМОСТИ

Сделан анализ параметров отработанных рабочих газов зерносушительных агрегатов и экономическая возможность использования их теплоты для повторного использования, исследована особенность использования теплоты отработанных рабочих газов разной влаговместимости, теоретически доказано и

экспериментально доказаны условия межфазового взаимодействия неподвижного шару зерна от параметров отработанных газов за которым критерий Кирпичева имеет наименьшее, а Нусельта наибольшее значение.

FEATURES MOTIONLESS TO THE SPHERE OF GRAIN OF WHEAT FROM WORKING GASES RAISED

The analysis of parametres of the fulfilled working gases units and economic possibility of use of their warmth for a reuse is made, feature of use of warmth of the fulfilled working gases different is investigated, conditions of interphase interaction motionless are theoretically proved and experimentally proved a sphere of grain from parametres of the fulfilled gases for which criterion Kirpicheva has the least, and Nuselta the greatest value.