УДК 631.362

Б.І. Котов, д.т.н.
Вінницький національний аграрний університет
О.Д. Курганский, аспірант
Національний університет біоресурсів та природокористування України

МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ЗЕРНА ПІСЛЯ СУШАРОК В ПНЕВМОСТАНІ

Подано математичну модель процесу охолодження нагрітого в сушарках зерна в пневмозваженому стані. Отримані

аналітичні залежності зміни параметрів зерна і повітря в процесі охолодження, формули для визначення експозиції і ефективності процесу.

ЗЕРНО, ОХОЛОДЖЕННЯ, ПНЕВМОЗВАЖЕНИЙ ШАР, РЕЖИМ ПРОЦЕСУ.

Постановка проблеми. Необхідність охолодження зерна після теплового сушіння є одною з важливих агротехнічних вимог до зерносушильних агрегатів і комплексів. Така технологічна операція здійснюється безпосередньо в сушарках (шахтних або колонкових). Практика експлуатації зерносушарок з вбудованими охолоджувальними камерами, які є продовженням сушильного тракту показала, що вони не забезпечують належного ефекту охолодження просушеного зерна і по суті гальмують процес сушіння в цілому. Виносні охолоджувальні колонки мають суттєві недоліки: необхідність в додаткових компенсуючи ємкостях і транспортних засобах (норії значної висоти для завантаження просушеного і перевантаження охолодженого зерна). Впровадження прогресивних способів охолодження зерна з одночасним його транспортуванням в одному технологічному процесі без додаткових транспортних засобів може забезпечити суттєве здешевлення процесу сушіння зерна в цілому і має важливе значення для зерновиробничих господарств.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Охолодження зерна атмосферним або штучно охолодженим повітрям поширено не лише для зменшення температури нагрітого в сушарках зерна але і для ліквідації самозігрівання вологого зерна при його зберіганні [1, 2]. Процес конвективного охолодження зерна нагрітого при сушінні або іншої термообробки атмосферним повітрям на протязі більше 40 років [3, 5] залишається основним способом не зважаючи на його реалізацію установках різних конструкцій [6-9].

За останні декілька років у зв’язку зі змінами у сільськогосподарському комплексі країни виникла необхідність в обладнанні механізації післязбиральної обробки зерна для підприємств з малим об’ємом виробництва. Зокрема, стали використовувати пересувні зерносушарки малої продуктивності (3-5 т/год) іноземних виробників із вбудованими камерами охолодження, які по суті є впровадженням сушильного тракту, на одну третину довжини. Таким чином, при використанні виносних охолоджувачів продуктивність сушильної установки можна підвищити як мінімум на 30% [3, 5]. Результати досліджень ряду авторів О. Тимоніна [10], А.В. Авдеева [3], П.Ф. Ханхасаєва [8], С. Шуханова [9], М. Соловьева [6] розкривають можливості суттєвої інтенсифікації процесу повітряного охолодження шляхом збільшення

швидкості обтікання частинок зернового матеріалу потоком охолоджуючого агента. Найбільш просто суміщення процесів охолодження і транспортування реалізується установкою пневматичного [6,10,11] та аерогравітаційного транспорту [7,11], де повітря є транспортуючим і охолоджуючим агентом. В існуючих наукових роботах [6-8] при визначенні часу (експозиції) охолодження (перебування в контакті з повітрям) як правило не враховують зміну температури повітря за часом, яке втрачає охолоджувальну здатність (температурний напір) при взаємодії з нагрітим зерновим матеріалом. В роботі [7] час охолодження за величиною, якого визначають конструктивні параметри установки розраховують без урахування інтенсивності теплообміну.

Мета дослідження – одержання аналітичних залежностей для розрахунків режимних і конструктивних параметрів охолоджуючих установок (придатних для оцінювання їх ефективності), в яких рух зерна здійснюють потоком повітря.

Результати дослідження. Динамічний процес охолодження потоку зерно матеріалу при переміщенні із взаємодією з потоком повітря, яке має температуру меншу від температури зерна можна проаналізувати, склавши математичну модель на основі рівнянь теплового балансу зерна і повітря для елементарного проміжку часу.

Основні припущення, на яких базується модель нестаціонарного теплообміну зерна і повітря:

- вважаємо, що теплофізичні властивості повітря і зерна в процесі охолодження змінюються мало і дорівнюють середнім значенням за процес;
- коефіцієнт теплообміну і питома поверхня матеріалу також приймаємо постійними, що не залежать від температури; складові теплообміну випромінюванням і контактом враховуються коефіцієнтом теплообміну;
- теплопередача від повітря і зерна через стінки апарата не враховуються; теплоємність стінки каналу також не враховується.

Відповідно до прийнятих припущень запишемо диференціальні рівняння для повітря і зерна:

$$m_v C_p \frac{dt}{d\tau} = \alpha F(\theta - t); \qquad (1)$$

$$m_з C_з \frac{d\theta}{d\tau} = \alpha F(t - \theta), \qquad (2)$$

де t, θ – температура повітря і зерна,°С; $m_v, m_з$ – маса повітря і зерна в об'ємі пневноканалу, кг; $C_p, C_з$ - питома теплоємність повітря і зерна, Дж/кг·°С; α - коефіцієнт теплообміну, Вт/м^2·°С; F - поверхня зерна,м^2; τ - поточний час, с.

Оскільки кількість матеріалу і його поверхня в пнемоканалі залежать від часу перебування і відповідно швидкості переміщення матеріалу, використаємо величину питомої поверхні зерна, яка є величиною постійною:

$$\sigma = \frac{F}{m_з}; \; m_з = \mu_i \cdot m_v \,, \qquad (3)$$

де σ – питома поверхня зерна, м^2/кг; μ_i - істинна масова концентрація зерна в пневмоканалі,кг/кг.

Перепишемо рівняння (1) і (2) з урахуванням співвідношень (3):

$$\frac{dt}{d\tau} = K_1 \cdot (\theta - t); \qquad (4)$$

$$\frac{d\theta}{d\tau} = -K_2 \cdot (\theta - t), \qquad (5)$$

де: $K_1 = \frac{\alpha \cdot \sigma}{C_p}\mu$; $K_2 = \frac{\alpha \cdot \sigma}{C_з}$.

Віднімаючи від рівняння (5) рівняння (4) матимемо:

$$\frac{d(\theta - t)}{d\tau} = -(K_1 + K_2) \cdot (\theta - t). \qquad (6)$$

Розв'язок рівняння (6) при початкових умовах: τ=0; θ-t=θ_0-t_0 (де θ_0, t_0 – початкові значення температури зерна і повітря) запишемо у вигляді:

$$\tau = \frac{1}{K} \ln \frac{\theta_0 - t_0}{\theta - t}\,, \qquad (7)$$

де: $K = K_1 + K_2$

Рівняння (7) визначає зміну в часі температурного напору $\Delta T_1 = (\theta_0 - t_0)$ величина якого є рушійною силою процесу відведення теплоти від зернового матеріалу. Час охолодження буде визначатися

кінцевими значеннями $\Delta T_2 = \theta_2 - t_2$, де θ_2, t_2– температура до якої охолоджується зерно і нагрівається повітря.

$$\tau_{ox} = \frac{1}{K} \ln \frac{\Delta T_0}{\Delta T_2}. \qquad (8)$$

За існуючими нормативами [1] температура зерна після сушарки не повинна перевищувати температуру навколишнього середовища на 10°С, тобто температуру атмосферного повітря: $\theta_2 \leq t_1 + 10$. Температуру, до якої може нагрітися охолоджуюче повітря t_2 можна прийти рівною температурі зерна на виході охолоджувача (мінус 1°С), який працює в режимі повного витиснення $t_2 = (\theta_2 - 1)$.

Таке припущення виправдане тим, що від стінок пнемоканалу постійно відводиться теплота (від нагрітого в процесі руху повітря) в оточуюче середовище, тобто установка працює практично з повним використанням охолоджуючого потенціалу повітря.

Величину істинної концентрації зерна при транспортуванні в пнемоканалі можна визначити використовуючи співвідношення між істинною і витратною концентрацією [6,10,11]:

$$\mu_i = \mu_p \frac{\overline{V_v}}{\overline{V_з}}; \ \mu_p = \frac{G_з}{G_v}, \qquad (9)$$

де $\overline{V_v}$, $\overline{V_з}$– середня швидкість повітря і матеріалу, м/с;

μ_p- витратна (розрахункова концентрація),

$G_з$, G_v- масові витрати зерна і повітря, кг/с.

Величину (температури відпрацьованого повітря t_2) визначаємо з рівняння теплового балансу:

$$G_v C_p (t_2 - t_0) = G_з C_з (\theta_0 - \theta_2). \qquad (10)$$

Тоді величина температурного напору:

$$\Delta T_2 = \theta_2 (1 + \mu'_p) - \mu'_p \cdot \theta_0, \qquad (11)$$

де: $\mu'_p = \mu_p \frac{C_з}{C_p}$

Величину $\frac{\overline{V_v}}{\overline{V_з}} = i$, яка є коефіцієнтом ковзання рухомих фаз можна визначити з емпіричного рівняння В. Шеймана [10]:

$$i = 1.8 + 0.06 \cdot \rho_з d_e,$$

де $\rho_з$ – густина речовини зерна, кг/ м^3;

d_e- еквівалентний діаметр зернини,м.

Величина витратної масової концентрації μ_p може бути визначена із рівняння теплового балансу:

$$\mu_p = \frac{C_p(t_2 - t_1)}{C_з(\theta_1 - \theta_2)}. \qquad (12)$$

Величина коефіцієнту теплообміну в залежності від швидкості повітряного потоку визначається із критеріального рівняння [8]:

$$\alpha = 0{,}215 \cdot \frac{\lambda \cdot d_e^{-0.44}}{V^{0.56}} \cdot V_v .$$

Величина експозиції охолодження зерна повітряним потоком в залежності від його температури і швидкості на вході наведена на рис. 1.

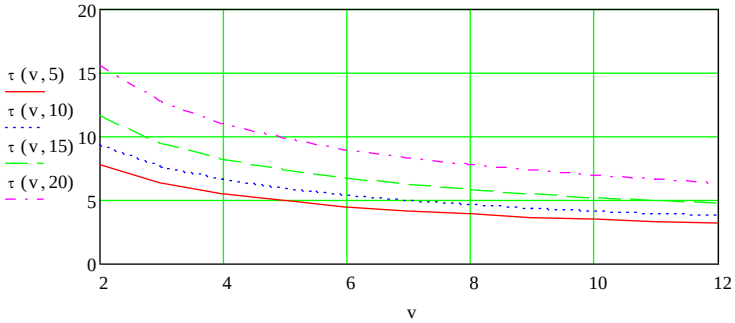


Рис. 1 – Залежність експозиції охолодження зерна у зваженому стані від відносної швидкості повітря і його температури

Кінетику охолодження зерна визначимо наступним чином. З рівняння (6) визначимо змінні значення температури зерна і повітря:

$$\theta = t + \Delta T_0 e^{-k\tau}; \qquad (13)$$

$$t = \theta - \Delta T_0 e^{-k\tau}. \qquad (14)$$

Підставляючи значення θ з рівняння (13) в рівняння (4), а значення t з рівняння (14) в (5) матимемо нові рівняння:

$$\frac{dt}{d\sigma} = K_1 \Delta T_0 e^{-k\tau}; \qquad (15)$$

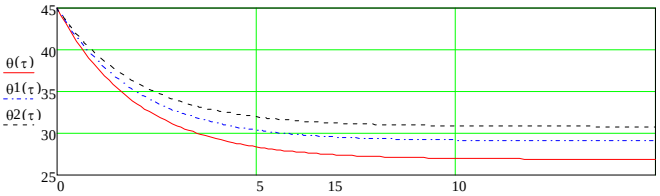
$$\frac{d\theta}{d\sigma} = -K_2 \Delta T_0 e^{-k\tau}. \qquad (16)$$

Розв'язок отриманих рівнянь при зазначених вище початкових умовах запишемо у вигляді:

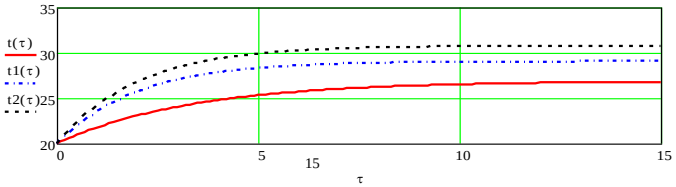
$$t(\tau) = t_0 + \frac{K_1}{K} \Delta T_0 (1 - e)^{-k\tau}; \qquad (17)$$

$$\theta(\tau) = \theta_0 - \frac{K_2}{K} \Delta T_0 (1 - e)^{-k\tau}. \qquad (18)$$

Рівняння (17) і (18) визначають зміну в часі температуру зерна і повітря в залежності від параметрів охолоджуючого повітря (витрати G_v і температура t_0), концентрації матеріалу в потоці повітря і швидкості відносно руху зерна в пневматичному тракті (рис. 2).



а)



б)

Рис. 2 – Зміна температури зерна (а) і повітря (б) в процесі охолодження: 1 (червона лінія) – μ = 0.2, 2 (синя лінія) = 0.3, 3 (чорна лінія) = 0.4

Ефективність використання повітря (як холодоагенту) можна проаналізувати за коефіцієнтом ефективності, аналогічним коефіцієнту ефективності використання сушильного агента [5]:

$$\eta = 1 - \frac{\Delta T_2}{\Delta T_0}\frac{G_з C_з}{G_v C_v}. \qquad (19)$$

Як показує аналіз (19) максимальну ефективність можна отримати при максимальному відпрацюванні охолоджуючого повітря, тобто $\Delta T_2 \to 0$.

Висновки. 1. Розроблено математичну модель і отримані формули для розрахунку параметрів процесу охолодження зерна у зваженому стані. 2. Встановлено, що максимальна ефективність процесу досягається при забезпеченні відносної швидкості повітря 8…12 м/с. Тому охолоджувальна установка повинна забезпечити час перебування 8-10 секунд.

Література

1. Послеуборочная обработка и хранение зерна / РнД «Март», 2001-240с.

2. Станкевич Г.Н. Техника и технологии использования искусственно охлажденного воздуха в процессе хранения зерна/Г.Н. Станкевич, Б.Н. Петруня// Хранение и переработка зерна. 2003 №3. с.52-53

3. Авдеев А.В. Изыскание и исследование рациональных охладителей для зерносушилок сельскохозяйственного назначения/ А.В. Авдеев автореф. дис. канд. техн. наук М.:ВИСКОМ.1975 -20с.

4. Алтухова Т.А. Экспериментальные исследования работы вихревого охладителя зерна с помощью полнофакторного эксперимента / Т.А. Алтухова, С.Н.Шуханов// Вестник Алтайского государственного аграрного университета 2013 №9 с.99-102

5. Сорочинский В.Ф. Повышение эффективности конвективной сушки зерна на основе интенсификаций тепло массообменных процессов/ В.Ф. Сорочинский Дис. докт. техн. наук. М.: 2003-358 с.

6. Соловьев М.И. Исследование теплообмена при движении зернистых материалов в горизонтальной пневмотрубе/ М.И. Соловьев, Автореф, дис. канд. техн. наук. Минск. 1964-20с.

7. Блохин П.В. Аэрогравитационный транспорт/ П.В. Блохин. М.:Колос 1974-120с.

8. Ханхасаєв П.Ф. Интенсификация процесса охлаждения зерна путем повышения скорости обдува атмосферным воздухом/ Ханхасаев П.Ф. Автореф. дис. канд. техн. наук. Новосибирск. 1989-18с.

9. Шуханов С.Н. Охлаждение зерна при порционном метании// ВестникАГАУ, 2011. – №4. С.88-92.

10. Муштаев В.И. Сушка в условиях пневмотранспорта/В.И. Мушаев, В.М. Ульянов, А.С. Тимонин. М.: Колос 1976 -344 с.