

УДК 631.365.22

Обґрунтування використання всмоктуючого повітряного потоку при сушінні зерна

Швидя В. О., к.т.н., Національний науковий центр "Інститут механізації та електрифікації сільського господарства", e-mail: Shvidia@gmail.com; тел.: +38(063)-529-30-20

Анеляк М. М., к.т.н., с.н.с., Національний науковий центр "Інститут механізації та електрифікації сільського господарства", e-mail: amm-michailo@ukr.net; тел. +38(096)-404-98-70

Степаненко С. П., к.т.н., с.н.с.; Національний науковий центр "Інститут механізації та електрифікації сільського господарства", e-mail: stepanenko_s@ukr.net; тел.: +38(050)-457-22-47

Анотація

Мета. Зменшити енергетичні витрати на сушіння зерна шляхом використання всмоктуючого повітряного потоку.

Методи. Використовувались методи термодинаміки та теорії тепломасообміну.

Результати. На основі диференціального рівняння тепло- і вологопереносу та аналізу умов випаровування водяної пари із зернівки отримано рівняння масообміну для сушіння зерна у потоці повітря.

Використовуючи емпіричні залежності парціального тиску водяної пари всередині зернівки від її температури та парціального тиску водяної пари в сушильному агенті від його вологовмісту, а також рівняння масообміну для сушіння зерна в потоці повітря, одержано рівняння швидкості

сушіння зерна від його температури та рівняння кінетики вологовмісту в зерні.

Графічний аналіз даних рівнянь показав, що використання всмоктуючого повітряного потоку дає можливість зменшити теплові витрати в порівнянні з нагнітаючим повітряним потоком.

Висновки. Використання всмоктуючого повітряного потоку при сушінні зерна дає можливість зменшити теплові витрати на 25–30% завдяки створення меншого парціального тиску водяної пари в навколзерновому просторі, ніж при нагнітаючому. Це дає підстави для його використання в промислових сушарках зерна після експериментальної перевірки.

Ключові слова: зерно, сушарка, агент сушіння, всмоктуючий повітряний потік, нагнітаючий повітряний потік, вологість, парціальний тиск, водяна пара.

UDC 631.365.22

Rationale for the use of the suction air flow when drying the grain

Shvidia V., Ph.D., National Science Center "Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture", e-mail: Shvidia@gmail.com; tel: + 38(093)-529-30-20

Anelyak M., Ph.D., National Science Center "Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture", e-mail: amm-michailo@ukr.net; tel.: +38(096)-404-98-70

Stepanenko S., Ph.D., National Science Center "Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture", e-mail: stepanenko_s@ukr.net; tel.: + 38(050)-457-22-47

Annotation

Purpose. Reduce energy costs for drying grain by using suction airflow.

Methods. The methods of thermodynamics and the theory of heat and mass transfer were used.

Results. In order for evaporation of moisture from the grain takes place, it is necessary that the partial pressure in the drying agent be less than the partial pressure of water vapor inside the grain.

Considering that the intensity of moisture release is proportional to the difference in partial

pressures outside and inside the grain, and also because the mass of water that has evaporated from the grain should equal the moisture mass that absorbed the drying agent, the mass exchange equations for drying the grain in the air stream were obtained. On the basis of which, after algebraic transformations, dependences of the drying rate and humidity change on the design-regime parameters of drying are obtained, the graphic interpretation of which shows a greater energy efficiency of drying when using suction airflow.

Conclusions. The use of suction air flow during grain drying allows to reduce heat costs by 25–30% due to the creation of a smaller partial pressure of water vapor in the near-grain space than when injected. This gives grounds for its use in industrial grain dryers after an experimental check.

Keywords: grain, dryer, drying agent, suction air flow, pumping air flow, humidity, partial pressure, water vapor.

УДК 631.365.22

Обоснование использования всасывающего воздушного потока при сушке зерна

Швидя В. О., к.т.н., Национальный научный центр "Институт механизации и электрификации сельского хозяйства", e-mail: Shvidia@gmail.com; тел.: +38(063)-529-30-20

Анеляк М. М., к.т.н., с.н.с., Национальный научный центр "Институт механизации и электрификации сельского хозяйства", e-mail: amm-michailo@ukr.net; тел. +38(096)-404-98-70

Степаненко С. П., к.т.н., с.н.с., Национальный научный центр "Институт механизации и электрификации сельского хозяйства", e-mail: stepanenko_s@ukr.net; тел.: +38(050)-457-22-47

Аннотация

Цель. Уменьшить энергетические затраты на сушку зерна путем использования всасывающего воздушного потока.

Методы. Использовались методы термодинамики и теории тепломассообмена.

Результаты. Для того, чтобы состоялось испарение влаги из зерна, необходимо, чтобы парциальное давление в сушильном агенте было меньше парциального давления водяного пара внутри зерна.

Учитывая, что интенсивность влаговыделения пропорциональна разнице парциальных давлений снаружи и внутри зерна, а также ввиду того, что масса воды, которая испарилась из зерна, должна равняться массе влаги, вобравшейся в себя агентом сушки, получены уравнения массообмена для сушки зерна в потоке воздуха. На основе их после алгебраических преобразований получены зависимости скорости сушки и изменения влажности от конструктивно-режимных параметров сушки, графическая интерпретация которых показывает большую энергоэффективность сушки при использовании всасывающего воздушного потока.

Выводы. Использование всасывающего воздушного потока при сушке зерна позволяет уменьшить тепловые затраты на 25–30% за счет

создания меньшего парциального давления водяного пара в околосерновом пространстве, чем при нагнетании. Это дает основания для его использования в промышленных сушилках зерна после экспериментальной проверки.

Ключевые слова: зерно, сушилка, агент сушки, всасывающий воздушный поток, нагнетающий воздушный поток, влажность, парциальное давление, водяной пар.

Проблема. Сушіння зерна відіграє важливу роль у післязбиральній обробці. У структурі енерговитрат для різних культур доля сушіння складає від 30 до 32%. У промисловому виробництві зерна господарства України використовують для сушіння переважно шахтні прямоочні сушарки, в яких зерно сушиться в щільному малорухливому шарі. В умовах обмежених енергоресурсів і підвищення цін на них постає питання ефективного їх використання для потреб сушіння зерна. Більшість розроблених методів з підвищення теплоефективності сушарок збільшили тепловий коефіцієнт корисної дії сушарки на 30%. Подальше збільшення теплового коефіцієнта корисної

дії сушарки вимагає додаткових наукових досліджень і є актуальною задачею.

Аналіз досліджень. Одним із методів підвищення енергетичної ефективності сушіння є використання вакууму. У дослідженнях [1] було експериментально показано, що вакуумне сушіння (при тиску 4000–6000 Па) забезпечує високу інтенсивність вологовидалення та питомих витрат енергії в порівнянні з сублимаційним і комбінованим сушінням. У роботі [2] також показана ефективність фракціонованих режимів сушіння, що дає можливість здійснювати регуляцію температурних і вологовмістних градієнтів. А в дослідженнях [3, 4] було запропоновано екологічно безпечний та енергоефективний метод сушіння, суть якого – вакуумне сушіння нагрітого сільськогосподарського

матеріалу. Дослідження [5] підтвердили перевагу вакуумного сушіння над іншими видами сушіння за показниками якості висушеного продукту та за ціною продукту й обладнання для сушіння.

Указані дослідження лише стосувались вакуумних сушарок періодичної дії для різних сільськогосподарських матеріалів. Невідомий вплив на сушіння невеликого вакууму (50–75 кПа, який досягається використанням всмоктуючого повітряного потоку) в прямоточних сушарках зерна, що робить дані дослідження актуальними.

Мета досліджень. Зменшити енергетичні витрати на сушіння зерна шляхом використання всмоктуючого повітряного потоку.

Результати досліджень. У загальних рисах процес сушіння зерна описується диференціальним рівнянням тепло- та вологопереносу за умови, що вся теплота $Q(\tau)$, підведена до поверхні вологого матеріалу, витрачається на його нагрівання та випаровування води:

$$Q(\tau) = r_0 m_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} + M_M c_3 \frac{\partial \theta}{\partial \tau}, \quad (1)$$

де r_0 – питома теплота пароутворення, Дж/кг;
 m_0, M_M – маса вологого та абсолютно сухого матеріалу, кг;
 u, θ – вологовміст і температура матеріалу, %, °С;
 c_3 – питома теплоємність матеріалу, Дж/кг °С;
 τ – час, с.

Для того, щоб відбулось випаровування вологи із зерна, необхідно, щоб парціальний тиск у сушильному агенті P_α був меншим за парціальний тиск водяної пари всередині зерна P_3 . Для цього використовують нагрівання зерна (рис. 1).

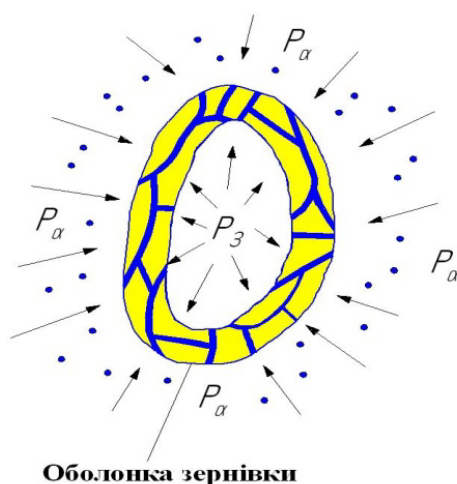


Рис. 1. Схема випаровування вологи із зерна
Fig. 1. Scheme of moisture evaporation from grain

Для «ідеальної» сушарки вся теплова енергія, що використана на нагрів зерна $M_M c_3 \frac{\partial \theta}{\partial \tau}$, повинна витратитись на випаровування вологи $r_0 m_0 \frac{\partial u}{\partial \tau}$. Тобто, для «ідеальної» енергоощадної сушарки повинна виконувати рівність:

$$r_0 m_0 \cdot \Delta u = M_M c_3 \cdot \Delta \theta, \quad (2)$$

де Δu , $\Delta \theta$ – зміна вологості та температури зерна.

Враховуючи, що інтенсивність вологовидалення пропорційна різниці тисків $P_3 - P_\alpha$, а також зважаючи на те, що маса вологи, яка випарувалась із зерна, повинна дорівнювати масі вологи, що увібрав у себе агент сушіння, отримуємо рівняння масообміну для сушіння зерна в потоці повітря:

$$\rho_3 \cdot V_3 \cdot W_t = f \cdot \beta \cdot V_c \cdot (P_3 - P_\alpha) \cdot W_c \cdot \tau, \quad (3)$$

де ρ_3 – густина сухого зерна, кг/м³;
 V_3, V_c – об'єм зерна та агента сушіння, відповідно, м³;
 W_t, W_c – швидкість сушіння зерна та насичення вологою агента сушіння, відповідно, %/с;
 f – питома поверхня зерна, м²/м³;
 β – коефіцієнт масообміну, кг/Па·с·м²;
 τ – час сушіння, с.

Парціальний тиск всередині зернівки P_3 та в сушильному агенті P_α залежить від температури зерна θ та вологовмісту сушильного агента D згідно досліджень [6]:

$$P_3 = a \cdot \theta + c, \quad (4)$$

$$P_\alpha = b \cdot D, \quad (5)$$

де a, b, c – емпіричні коефіцієнти: $a = 2,15$; $b = 1,14$; $c = 25$.

Так як при сушінні вологовміст сушильного агента постійно збільшується з часом і завжди має перед початком сушіння початкову вологість D_0 , то формулу (5) можна переписати у вигляді:

$$P_\alpha = b \cdot (D_0 + W_c \cdot \tau). \quad (6)$$

Враховуючи залежності (4), (6) та те, що

$$W_t = W_c; V_c = V - V_3,$$

де V – об'єм камери сушіння, м³,

$$W_c \cdot \tau = \Delta W,$$

де ΔW – зміна вологості зерна за один цикл сушіння, %, після алгебраїчних перетворень виразу (3) отримуємо залежність швидкості сушіння зерна W_t від його температури θ :

$$W_t(\theta) = \frac{f \cdot \beta \cdot (V - V_3) \cdot [2,15 \cdot \theta + 25 - 1,14 \cdot D_0] \cdot \Delta W}{\rho_3 \cdot V_3 + 1,14 \cdot \tau \cdot f \cdot \beta \cdot (V - V_3) \cdot \Delta W}. \quad (7)$$

Для визначення кінетики сушіння перетворимо вираз (3) без врахування $W_c \cdot \tau = \Delta W$ та прийнявши, що $W_t = \frac{dW}{d\tau}$. Унаслідок отримаємо диференціальне рівняння сушіння в потоці сушильного агента:

$$\frac{dW}{d\tau} = \frac{K1 \cdot \tau - K3}{K2 \cdot \tau^2}, \quad (8)$$

де $K1 = 2,15 \cdot \theta + 25 - 1,14 \cdot D_0$;

$$K2 = 1,14 \cdot f \cdot \beta \cdot (V - V_3);$$

$$K3 = \rho_3 \cdot V_3.$$

Вирішуючи диференціальне рівняння (8) за початкових умов $\tau = 0$; $W = W_0$ одержимо залежність, що описує зміну вологості у часі:

$$W(\tau) = \frac{K3}{K2 \cdot \tau} + \frac{K1}{K2} \ln(\tau). \quad (9)$$

На основі залежностей (7) та (9) побудовані графічні залежності швидкості сушіння від температури, а також зміни вологості зерна від температури при експозиції сушіння 6 год. (рис. 2).

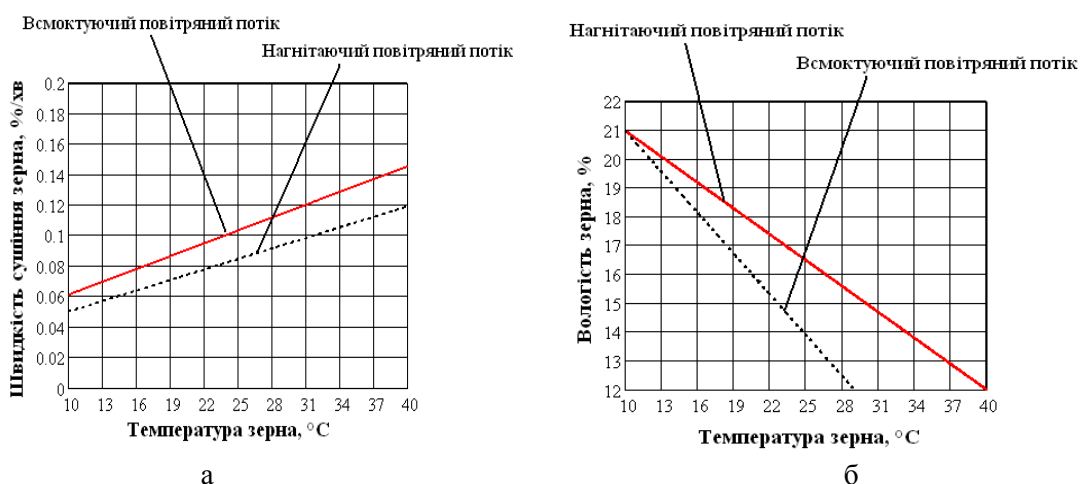


Рис. 2. Графічні залежності швидкості сушіння зерна W_t (а) та зміни вологості зерна W (б) при експозиції сушіння 6 год від його температури θ
Fig. 2. Graphical dependences of grain drying speed W_t (a) and grain moisture content W (b) at the exposure of drying 6 h. from its temperature θ

Графічні залежності побудовані для пшениці з початковою вологістю $W_0 = 21\%$, зміні вологості в процесі сушіння $\Delta W = 6\%$, початковій вологості агента сушіння $D_0 = 16\%$ та об'ємі сушильної камери $V = 10 \text{ м}^3$, при різних видах повітряного потоку (всмоктуючий і нагнітаючий – різне значення коефіцієнта c).

З рисунку 2 випливає, що використання всмоктуючого повітряного потоку дає можливість видаляти вологу при менших витратах теплової енергії за рахунок меншого парціального тиску водяної пари в сушильному агенті $P_\alpha(D)$, ніж при нагнітаючому повітряному потоці. Це дає можливість зменшити теплові витрати на 25–30%. Але дані тео-

ретичні залежності потребують експериментальної перевірки.

Висновки

Використання всмоктуючого повітряного потоку при сушінні зерна дає можливість зменшити теплові витрати на 25–30% за рахунок створення меншого парціального тиску водяної пари у навколзерновому просторі, ніж при нагнітаючому. Це дає підстави для його використання в промислових сушарках зерна після експериментальної перевірки.

Бібліографія

1. Семенов В. Г., Буданцев Е. В., Булкин М. С. Качество и энергозатраты в

процессах вакуумного обезвоживания термолабильных материалов. *Известия Вузов. Пищевая технология*. 2011. № 1. С. 65–67.

2. Вакуумная сушка сельхозпродукции, влияние различных видов и режимов сушки на энергетические затраты, биологическую и пищевую ценность. / В. А. Кутовой [и др.]; ННЦ ХФТИ. Х., 2003. 23 с.

3. Некоторые особенности термовакуумной сушки / Н. П. Дикий, А. М. Егоров, В. А. Кутовой [и др.]. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники*. 2007. № 4 (16). С. 53–57.

4. Патент 81138 UA, МПК F26B 9/06 (2006) F26B 3/20 (2006.01). Пристрій для термовакуумного сушіння / Кутувий В. О. № а 200507488; заявл. 27.07.2005; опубл. 10.12.2007, Бюл. № 20.

5. Super vacuum belt dryer // Hisaka Works, Ltd. 4,4 Chome, Hiranomachi. Higashi-Ku. Osaka 541, Japan, 1997.

6. Краусп Р. В. Автоматизация послеуборочной обработки зерна. М.: Машиностроение, 1975. 227 с.

Bibliografii

1. Semenov V. G., Budantsev Ye V., Bulkin M. S. Kachestvo i energozatraty v protsessakh vakuumnogo obezvozhivaniya termolabil'nykh materialov. *Izvestiya Vuzov Pishchevaya tekhnologiya*, 2011. № 1. S. 65–67.

2. Vakuumnaya sushka sel'khozproduktii, vliyaniye razlichnykh vidov i rezhimov sushki na energeticheskiye zatraty, biologicheskuyu i pishchevuyu tsennost' / V. A. Kutovoy [i dr.]; NNTS KHFTI. KH., 2003. 23 s.

3. Nekotoryye osobennosti termovakuumnoy sushki / N. P. Dikiy, A. M. Yegorov, V. A. Kutovoy [i dr.]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Vakuum, chisty-*

ye materialy, sverkhprovodniki. 2007. № 4 (16). S. 53–57.

4. Patent 81138 UA, МПК F26B 9/06 (2006) F26B 3/20 (2006.01) Pristrій dlya termovakuumnogo sushinnya / Kutoviy V. O. № а 200507488 ; zayavl. 27.07.2005 ; opubl. 10.12.2007, Byul. № 20.

5. Super vacuum belt dryer // Hisaka Works, Ltd. 4,4 Chome, Hiranomachi. Higashi-Ku. Osaka 541, Japan, 1997.

6. Krausp R. V. Avtomatizatsiya posleuborochnoy obrabotki zerna. М.: Mashinostroyeniye, 1975. 227 s.

Bibliography

1. Semenov V., Budantsev E., Bulkin M. Quality and energy costs in the processes of vacuum dewatering of thermolabile materials. *Izvestiya Vuzov Food technology*, 2011. № 1. P. 65–67.

2. Vacuum drying of agricultural products, the effect of different types and drying regimes on energy costs, biological and nutritional value / V. Kutovoi [and others] NSC KIPT. H., 2003. 23 p.

3. Some features of thermo vacuum drying / N. Wild, A. Egorov, V. Kutovoy [and others]. *Questions of atomic science and technology. Series: Vacuum, pure materials, superconductors*. 2007. № 4 (16). P. 53–57.

4. Patent 81138 UA, IPC F26B 9/06 (2006) F26B 3/20 (2006.01) Attachment for thermovacuum drying / Kutovy V. No. 200507488; claimed. 27.07.2005; publ. 10.12.2007, Bul. No. 20.

5. Super vacuum belt dryer // Hisaka Works, Ltd. 4.4 Chome, Hiranomachi. Higashi-Ku. Osaka 541, Japan, 1997.

6. Krausp R. Automation of post-harvest grain processing. М.: Mechanical engineering, 1975. 227 c.