

УДК 664.723-9

ББК 36.821

К-76

Миронов Николай Александрович, аспирант кафедры машин и аппаратов пищевых производств Кубанского государственного технологического университета, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, т.:(861)2752279;

Подгорный Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов Кубанского государственного технологического университета, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, т.:(861)2559392;

Кошевой Евгений Пантелеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машин и аппаратов пищевых производств Кубанского государственного технологического университета, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, т.:(861)2752279;

Косачев Вячеслав Степанович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машин и аппаратов пищевых производств Кубанского государственного технологического университета, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, т.:(861)2752279.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СУШКИ ЗЕРНА В СЛОЕ ЧЕРЕЗ ПОТЕНЦИАЛ МАССОПЕРЕНОСА

(рецензирована)

В работе представлена идентификация экспериментальных данных по кинетике сушки зерна пшеницы по модели сушки слоя через потенциал переноса влаги.

Ключевые слова: сушка, зерно пшеницы, кинетика, потенциал.

Mironov Nikolai Alexandrovich, post-graduate of the Department of machines and equipment for food industry, Kuban State Technological University, 350072, Krasnodar, 2 Moscovskaya St., tel: (861) 2752279;

Podgorny Sergei Alexandrovich, Candidate Of Technical Sciences, assistant professor of Automation of Production Processes Department, Kuban State Technological University, 350072, Krasnodar, 2 Moscovskaya St., tel: (861) 2559392;

Koshevoi Eugene Panteleevich, Doctor Of Technical Sciences, Professor, head of the Department of machines and equipment for food industry, Kuban State Technological University, 350072, Krasnodar, 2 Moscovskaya St., tel: (861) 2752279;

Kosachev Vyacheslav Stepanovich, Doctor Of Technical Sciences, professor, professor of the Department of machines and equipment for food industry, Kuban State Technological University, 350072, Krasnodar, 2 Moscovskaya St., tel: (861) 2752279;

IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF DRYING GRAIN LAYER THROUGH THE MASS TRANSFER POTENTIAL

In this research the identification of experimental data on the kinetics of wheat grain drying on the model of drying layer through the potential of moisture transfer has been presented.

Keywords: drying, wheat grain, kinetics, potential.

Разработанная математическая модель сушки слоя зерна [1] для дальнейшего ее использования в моделировании и оптимизации процесса сушки с инвертированием требует значения параметров.

Для идентификации параметров процесса сушки зерна использовали экспериментальные данные, полученные при сушке неподвижного слоя зерна в условиях стационарного режима управления.

Исследования переменных режимов процесса сушки зерновых культур проводились в ВГТА на экспериментальной установке, изготовленной и установленной на ОАО «Бутурлиновский мелькомбинат».

Сушильная камера представляла собой цилиндр диаметром 500 мм и высотой 1300 мм. Нижняя часть камеры имела газораспределительную решетку, на которую загружалось зерно.

В ходе исследования требуемый режим по температуре и расходу сушильного агента (воздуха) поддерживался автоматически. Нагрев сушильного агента производился в электрокалорифере, а расход – нагнетающим центробежным вентилятором.

Опыты проводились с зерном озимой пшеницы сорта «Мироновская», выращенным в Воронежской области. Для получения зерна с начальной влажностью 19-25% производилось искусственное увлажнение

массы зерна подачей расчетного количества воды с последующей отлежкой и перемешиванием в полиэтиленовых мешках, помещенных в холодильник с поддержанием температуры 278...288 К в течение 3...4 суток.

Отобранные пробы зерна для определения влажности высушивались стандартным методом до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 403 К в течение 40 минут.

Кинетика сушки зерна исследовалась при постоянных параметрах процесса: температура, линейная скорость и влагосодержание сушильного агента. Слой высушиваемого зерна создавался загрузкой в сушильную камеру через приемное устройство на газораспределительную решетку до заданного уровня.

Значения избыточных потенциалов можно определить по функции локальной разности потенциалов:

$$\Delta \Theta_f(a, b, N_{\max}) = e^{-(a+b)} \cdot \sum_{N_{\text{var}}=0}^{N_{\max}} \frac{(a \cdot b)^{N_{\text{var}}}}{(N_{\text{var}}!)^2} \quad (1)$$

через которую выражаются потенциал сушильного агента:

$$\Theta_{1f}(a, b, N_{\max}) = 1 - \int_0^a \Delta \Theta_f(x, b, N_{\max}) dx \quad (2)$$

и потенциал слоя высушиваемого материала:

$$\Theta_{2f}(a, b, N_{\max}) = \int_0^b \Delta \Theta_f(a, x, N_{\max}) dx \quad (3)$$

Использование выражения относительных потенциалов сушильного агента и слоя высушиваемого материала:

$$\Theta_1(a, b) = \frac{\Theta_{1f}(a, b) - \Theta_{2f}(a, 0)}{\Theta_{1f}(0, b) - \Theta_{2f}(a, 0)} \quad (4)$$

$$\Theta_2(a, b) = \frac{\Theta_{2f}(a, b) - \Theta_{1f}(a, 0)}{\Theta_{1f}(0, b) - \Theta_{2f}(a, 0)} \quad (5)$$

вместе с формулами (2) и (3) позволяет определить значение локального размерного потенциала слоя зерна (Дж/кг) в процессе сушки по следующему соотношению:

$$\Theta_2(a, b) = \Theta_{1_0b} | x_v, P_r, T_r | \cdot \Theta_2(a, b) - \Theta_2 | u_n | \cdot \Theta_2(a, b) + \Theta_2 | u_n | \quad (6)$$

где $\Theta_2(u_n)$ – потенциал слоя зерна в начале сушки, (Дж/кг); определяемый по следующему соотношению:

$$\Theta_2(u) = 575566 \cdot \exp(-16.1627 \cdot u) \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \quad (7)$$

где аргумент функции (7) используемой в формуле (6) u_n – начальное влагосодержание зерна.

Θ_{1_0b} – начальный потенциал сушильного агента, определяемый по формуле:

$$\Theta_{1_0b} | x_v, P_r, T_r | = \frac{| R_{sv} + x_v \cdot R_p | \cdot P_r \cdot T_r}{| 1 + x_v | \cdot | 0.622 + x_v | \cdot P_s | T_r |} \quad (8)$$

где аргументы функции (8), используемой в формуле (6), x_v – начальное значение влагосодержания воздуха; P_r – нагрузка на решетку, T_r – температура сушильного агента на входе в слой. Параметры уравнения $R_{sv} = 287.1$ Дж/(кг·град) и $R_p = 461.5$ Дж/(кг·град) – газовые постоянные сухого воздуха и перегретого водяного пара; $P_s(T_r)$ – зависимость давления насыщенных паров влаги от температуры.

При идентификации параметров процесса сушки учитывалось, что влажность слоя определялась как средняя по высоте слоя. Следовательно, использование формул (1)...(8) должно основываться на интегрировании по высоте слоя, что соответствует усреднению по параметру (а). Поэтому величина потенциала зерна может быть выражена формулой:

$$\Theta_{2\text{avg}} | a, b, x, P, T, u | = \frac{\int_0^a | \Theta_{1_0b} | x, P, T | \cdot \Theta_2(a, b) - \Theta_2(u) \cdot \Theta_2(a, b) + \Theta_2(u) | da}{a} \quad (9)$$

Рассчитывали относительное изменение потенциала семян в процессе сушки по экспериментальным данным, измеренным в одиннадцати моментах времени, аппроксимируя

расчетную зависимость относительного изменения потенциала, минимизировали квадратичные отклонения, определяя минимум целевой функции:

$$Z(a, \beta) = \sum_{i=0}^{11} \sqrt{\left(\frac{|\Theta_{2экс_i} - \Theta_{2avg} | a, \beta \cdot y_i, x_v, P_{atm} + P_r, T_r, u_n |}{\Theta_{2экс_i}} \right)^2} \quad (10)$$

где β – масштабный множитель, определяющий параметр $b_i = \beta \cdot y_i$. Вектор y_i представляет собой условное смещение слоя материала по координате b в опытах, определяемое как относительное удлинение слоя по горизонтали сушильной камеры. Горизонталь сушильной камеры определялась следующим соотношением:

$$Y_{гор} = \sqrt{\pi \cdot \frac{(0.5 \cdot M)^2}{4}} = 0.443 \cdot M \quad (11)$$

Вектор $\Theta_{2экс}$ определяется по уравнению (5) в котором аргументом является текущая средняя влажность слоя материала через каждые 6 минут сушки. Идентификация параметров a и β была проведена при различных значениях удельной нагрузки на решетку слоем зерна (P_r, Pa), температуре воздуха на входе в слой семян (T_r, K), влагосодержании воздуха ($x_v, \text{кг/кг}$), скорости воздуха ($V_r, \text{м/с}$). В результате были получены данные, адекватно описывающие изменение потенциала слоя зерна в процессе сушки. В то же время было установлено, что такая прямая параметрическая оптимизация дает высокую вариабельность этих параметров. Было установлено, что целевая функция (10) обладает значительной овражностью, что наглядно видно на рисунке 1.

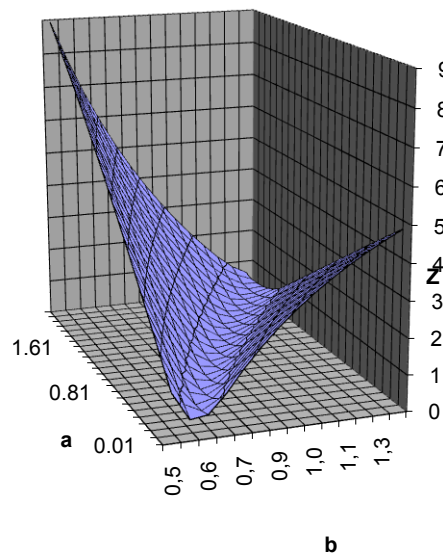


Рис. 1. Зависимость целевой функции Z от оптимизируемых параметров

Дно оврага (рис. 1) соответствует области близкой к стационарной, имеющий экстремум типа «седло». Поэтому в дальнейшем было принято решение перейти от двухпараметрической оптимизации к однопараметрической по параметру (b). В этом случае необходимо оценить параметр (a), который может быть выражен через коэффициент массопередачи, плотность слоя зерна, отношения массоемкостей сушильного агента и зерна, скорости воздуха, проходящего через слой материала и сечение слоя. Общая формула для оценки параметра (a) может быть представлена следующим соотношением:

$$a_{экс} | P_r, T_r, u_n | = \frac{K_M | T_r | \cdot \rho_{пшн} | u_n | \cdot C_{m2} \cdot Y_{гор} \cdot X_{вер} | P_r, u_n |}{V_r \cdot \left(1.29 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \frac{273 \cdot \text{К}}{T_r} \right) \cdot C_{m1} \cdot \left[\pi \cdot \frac{(0.5M)^2}{4} \right]} \quad (12)$$

Параметр $K_M(T_r)$ определяется из соотношения:

$$K_M | T | = \frac{D_{In} | T |}{R_{sm}} \quad (13)$$

где R_{sm} – эквивалентный радиус зерна (2,01 мм).

Коэффициент диффузии влаги в зерне определяется по формуле:

$$D_{In} | T | = D_0 \cdot \exp \left(- \frac{E}{8.314 \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{Моль} \cdot \text{К}} \cdot T} \right) \quad (14)$$

Параметры, входящие в уравнение (14), определены обработкой данных [2] $D_0 = 1,19 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $E = 28095 \text{ Дж/кг}$.

Плотность высушиваемого слоя пшеницы определялась сплайн-функцией $\rho_{пшн}(u_n)$.

Значение вертикальной составляющей в эксперименте определялось по формуле:

$$X_{вер} | P, u | := \frac{P}{\rho_{пшн}(u) \cdot g} \quad (15)$$

Остальные параметры определялись из условия проведения эксперимента. Таким образом определив значение параметра ($a_{жкс}$) в каждом эксперименте перешли к одномерной оптимизации параметра (b). Оцениваемый параметр K_{Θ} определялся по формуле:

$$K_{\Theta} | a, b, x, P, T, u | := \frac{\Theta_{2avg} | a, b, x, P, T, u | - \Theta_2 | u_n |}{\Theta_{1_0b} | x_v, P, T | - \Theta_2 | u_n |} \quad (16)$$

Пример сопоставления кинетических кривых сушки во влагосодержаниях и потенциалах представлены для одного из опытов на рисунке 2.

Обобщенная кривая кинетики сушки слоя зерна пшеницы через потенциалы по данным опытов в зависимости от параметра b представлена на рисунке 3.

Обобщенная кривая сушки может быть представлена следующим уравнением:

$$K_{\Theta} = -0,3384 \cdot b^2 + 0,9551 \cdot b \quad (17)$$

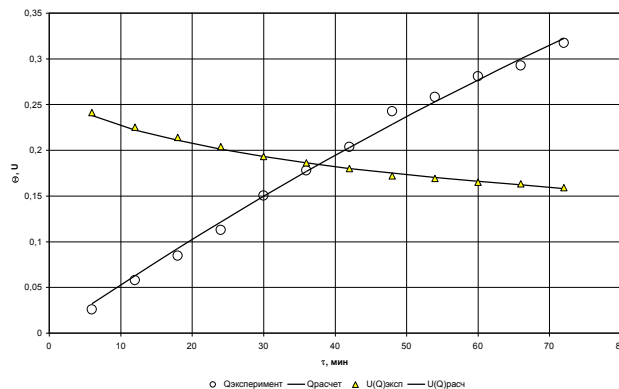


Рис. 2. Сопоставление кривых сушки в потенциалах и влагосодержаниях

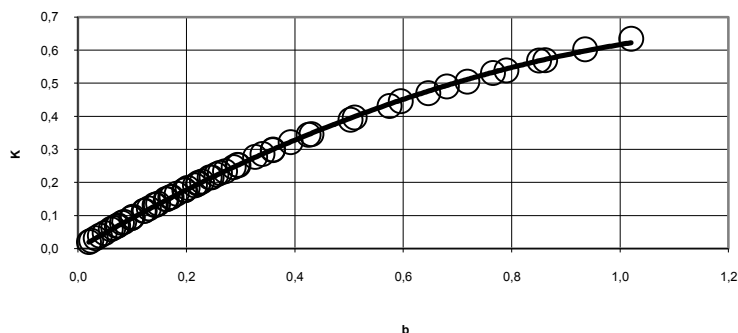


Рис. 3. Обобщенная кривая кинетики сушки по данным опытов в зависимости от параметра b

Обработка экспериментальных данных показала, что параметр b линейно связан со временем сушки материала (рисунк 4).

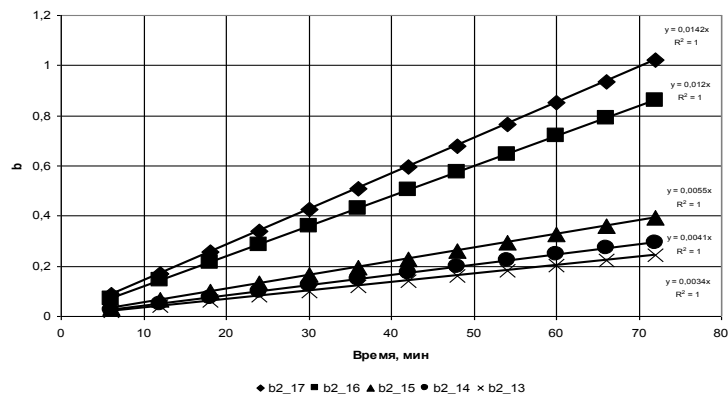


Рис. 4. Связь параметра b со временем в опытах при различных режимах

Представленные на рисунке 4 графики показывают линейный характер зависимостей $b = K_b \cdot \tau$ и различные коэффициенты наклона K_b , что связано с влиянием факторов в опытах – различной высотой слоя, температурой и скоростью сушильного агента в процессе сушки. Значения этих факторов и соответствующий им разный угол наклона K_b представлены в таблице 1.

Представленные в таблице 1 данные, были обобщены в виде линейного регрессионного уравнения:

$$K_b = -0,07206 + 0,000186 \cdot T_r + 1,25 \cdot 10^{-5} \cdot P_r + 0,000229 \cdot V_r + 1,98 \cdot 10^{-9} \cdot T_r \cdot P_r \cdot V_r \quad (18)$$

Таблица 1 - Значения факторов и угла наклона K_b

	Температура, К	Высота слоя, Па	Скорость воздуха, м/с	K_b
	T_r	P_r	V_r	
1	403	650	4	0,0142
2	403	600	2	0,0120
3	383	350	3,6	0,0055
4	383	320	1,6	0,0041
5	383	300	0,4	0,0034

Уравнение (18) полностью описывает изменение коэффициента наклона от различной температуры, высоты слоя и скорости сушильного агента в процессе сушки, так как число опытов совпадает с числом коэффициентов этого уравнения. Для определения значимости коэффициентов регрессионного уравнения (18) были нормированы данные таблицы 1 с использованием среднего значения и стандартного отклонения каждой из рассматриваемых величин. В результате дисперсионного анализа было установлено, что статистически значимыми факторами являются температура (T_r) и скорость воздуха (V_r). При этом адекватное уравнение, описывающее изменение угла наклона (K_b) от этих реальных факторов (ненормированных), имеет вид:

$$K_b = -0,15345 + 0,00041 \cdot T_r + 0,00052 \cdot V_r \quad (19)$$

Адекватность уравнения (19) подтверждается значительной величиной информационного критерия Фишера ($F_{инф} = 127$). Таким образом, установлено, что при увеличении температуры и скорости воздуха угол наклона (K_b) возрастает и скорость сушки увеличивается. Влияние высоты слоя с учетом усреднения потенциала по высоте оказалось незначимым.

Литература:

1. Миронов Н.А., Косачев В.С., Кошевой Е.П. Описание массообмена в слое при сушке // Инновационные технологии и оборудование для пищевой промышленности (приоритеты развития): материалы III международной научно-технической конференции. В 3 т. Т.2 / ВГТА. Воронеж, 2009. С. 277-281.
2. Chavez L.V., Vera C.M., Martinez R.S.R., Mendoza M.G.V. Analysis of wheat (Triticum aestivum) drying kinetics in a fluidized bed. 18th International Congress of Chemical and Process Engineering 24-28 August 2008. Prague, Czech Republic