

*МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВАРИВАНИЯ
КУКУРУЗНОЙ КРУПКИ*

**Т.Г. КОРОТКОВА¹, А.А. СХАЛЯХОВ², Х.Р. СИУХОВ²,
С.В. ЧЕРЕПОВ²**

¹ *Кубанский государственный технологический университет,
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2;
электронная почта: korotkova1964@mail.ru*

² *Майкопский государственный технологический университет,
352700, Российская Федерация, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191;
электронная почта: siukhov@mail.ru*

Выполнен анализ известных литературных данных по значениям коэффициентов диффузии влаги в кукурузе (зерне, зародыше и крахмале), полученных при увлажнении и при сушке воздухом, имеющем различную относительную влажность в диапазоне температур от 25 до 100 °С. Установлено, что значения коэффициентов диффузии находятся в диапазоне от $3 \cdot 10^{-11}$ м²/с при температуре 25 °С до $3,52 \cdot 10^{-10}$ м²/с при температуре 100 °С. Приведенные значения коэффициентов диффузии получены путем обработки экспериментальных данных с использованием известных аналитических решений уравнения нестационарной диффузии при представлении твердого материала в форме шара или пластины. При более высоких температурах данные по коэффициентам диффузии отсутствуют. Температуры выше 100 °С применяются при высокотемпературном разваривании зернового замеса. Данные по двухступенчатому развариванию кукурузной крупки взяты в настоящей работе по результатам обследования спиртзавода ООО «Стандарт Спирт» (Кабардино-Балкарская республика, г. Нарткала). Разработанная ранее и идентифицированная по производственным и лабораторным данным математическая модель разваривания зернового замеса применена для моделирования процесса двухступенчатого разваривания кукурузной крупки с размером частиц 1 мм. Модель основана на уравнении нестационарной диффузии, решение которого проведено методом сеток по неявной схеме. Она учитывает концентрационные, температурные зависимости и эффект отрыва набухших крахмальных слоев. Приведена графическая зависимость известных и собственных экспериментальных данных $\ln(D)$ от температуры, которая свидетельствуют о том, что при высоких температурах величина коэффициента диффузии при насыщении крупки влагой снижается. Причиной этого является изменение структуры крахмальных гранул при высокотемпературном разваривании.

Ключевые слова: двухступенчатое разваривание, математическое моделирование, кукурузная крупка, коэффициент диффузии.

Для моделирования процессов сушки, увлажнения зерна и разваривания зерновой крупки необходимо знание коэффициентов диффузии.

Рассмотрим известные экспериментальные исследования по коэффициентам диффузии влаги в зерне кукурузы, зародыше и кукурузном крахмале. В работе [1] изучена массопередача и физико-химические свойства

никстамализованной кукурузы с и без механического перемешивания при различной температуре. Проведены исследования диффузии влаги при увлажнении замеса никстамализованной $\text{Ca}(\text{OH})_2$ кукурузы при температурах 70, 80, 90 и 100 °С. Соотношение кукуруза – вода составляло 1 : 3. Коэффициент диффузии D вычислен при обработке экспериментальных данных с использованием уравнения (1) (таблица 1).

Размеры зерна кукурузы представлены в форме прямоугольного параллелепипеда (рисунок 1).

Таблица 1 – Коэффициенты диффузии влаги в никстамализованной кукурузе

Перемешивание	Температура, °С	Коэффициент диффузии, м ² /с
Без с	70	$2,27 \cdot 10^{-10}$
		$2,07 \cdot 10^{-10}$
Без с	80	$2,39 \cdot 10^{-10}$
		$2,98 \cdot 10^{-10}$
Без с	90	$2,95 \cdot 10^{-10}$
		$2,90 \cdot 10^{-10}$
Без с	100	$3,52 \cdot 10^{-10}$
		$2,96 \cdot 10^{-10}$

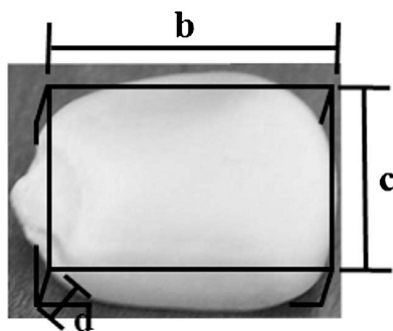
$$E = \frac{C - C_{\infty}}{C_0 - C_{\infty}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[(2n+1)^2 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \frac{D\tau}{a^2} \right], \quad (1)$$

где E - доля насыщения влагой; C - текущая концентрация влаги зерне в момент времени τ ; C_0 - начальная концентрация влаги в момент времени $\tau = 0$; C_{∞} - равновесная концентрация влаги; a – линейный размер каждой стороны параллелепипеда.

Суммарная доля насыщения влагой E вычислена по уравнению (2)

$$E = f \left(\frac{dt}{b^2} \right) f \left(\frac{dt}{c^2} \right) f \left(\frac{dt}{d^2} \right) = E_b E_c E_d = f(D, \tau, a), \quad (2)$$

где b, c, d - линейные размеры длины, ширины и толщины параллелепипеда; t - температура разваривания.



$$b = 0,01174 \text{ м}; c = 0,00922 \text{ м}; d = 0,00453 \text{ м}$$

Рисунок 1 – Геометрическая форма представления зерна кукурузы [1]

В работе [2] проведена сушка крахмала кукурузы при значениях относительной влажности воздуха 56 и 62 %. Коэффициенты диффузии влаги в крахмале кукурузы вычислены путем обработки экспериментальных данных при 25 °С по уравнению (3) и составили соответственно $1,1 \cdot 10^{-11}$ и $8,3 \cdot 10^{-12}$ м²/с.

$$\frac{m - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \frac{-n^2 \pi^2 D \tau}{r^2}, \quad (3)$$

где m - текущая концентрация влаги зерне в момент времени τ ; m_0 - начальная концентрация влаги в момент времени $\tau = 0$; m_e - равновесная концентрация влаги; D - коэффициент диффузии; r - координата.

Величина m_e определена с использованием экспериментально полученной зависимости изотермы сорбции для кукурузного крахмала при 25 °С, приведенной на рисунке 2.

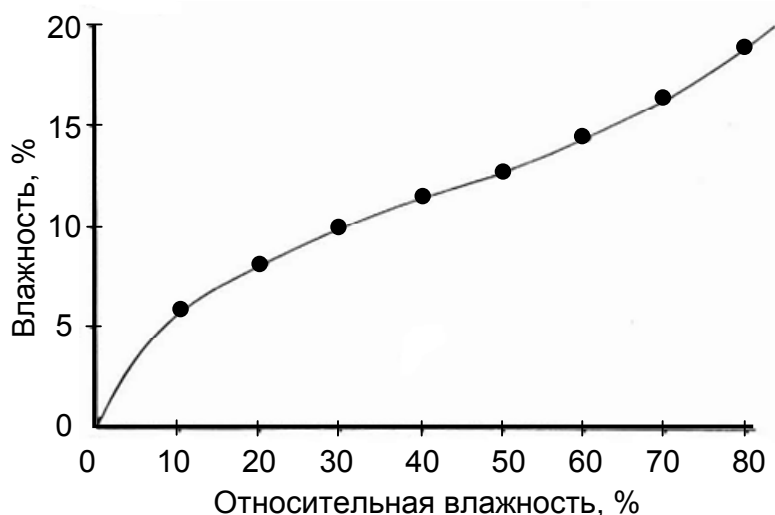


Рисунок 2 – Кривая сорбции кукурузного крахмала при 25 °С

В работе [3] проводилась сушка зародышей кукурузы и кукурузных зерен при относительной влажности 75, 80 и 90 % и температуре 25, 30, 35 и 40 °С. Полученные коэффициенты диффузии представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Коэффициенты диффузии влаги, $D \cdot 10^7$, м²/ч, в зародышах и зерне кукурузы

Температура, °С	Относительная влажность, %	Кукуруза		
		Зерно (сорт)		Зародыш
		FR27xMO17	P3576	
25	75	0,97	0,97	0,26
	80	0,68	-	0,16
	90	0,60	0,83	0,15
30	75	1,01	1,36	0,49
	80	0,90	-	0,20
	90	0,78	1,20	0,17
35	75	1,24	1,71	0,60
	80	1,20	-	0,32
	90	0,88	1,09	0,24
40	75	1,40	1,65	1,03
	80	1,32	-	0,39

В работе [4] коэффициенты диффузии в зерне кукурузы определены при температурах 55 и 75 °С и составили, соответственно: $9,488 \cdot 10^{-11}$ и $1,768 \cdot 10^{-10}$ м²/с.

В работе [5] определены значения эффективного коэффициента диффузии D_{eff} , м²/с, при сушке ферментированной кукурузы при 60, 65 и 70 °С (таблица 3) при обработке экспериментальных данных по уравнению

$$\frac{M - M_0}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{n=1} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \frac{-(2n-1)^2 \pi^2 D_{eff} \tau}{4l^2}, \quad (4)$$

где M - текущая концентрация влаги в зерне в момент времени τ ; M_0 - начальная концентрация влаги в момент времени $\tau = 0$; M_e - равновесная концентрация влаги; l - половина толщины пластины, м.

Таблица 3 – Эффективный коэффициент диффузии

Скорость сушильного агента (воздуха), м/с	Температура сушки, °С	Эффективный коэффициент диффузии, м ² /с, ($D_{eff} \cdot 10^{-11}$)
1,37	60	2,78
1,37	65	2,95
1,37	70	3,06

Полученные в работах [1-5] коэффициенты диффузии представлены на рисунке 3 в виде круглых точек. Как видно из рисунка 3, все экспериментальные данные приведены до температуры 100 °С. Значения коэффициентов диффузии при более высоких температурах (до 145 °С), которые имеют место при двухступенчатом разваривании кукурузной крупки, не исследованы. Между тем в процессе разваривания влага доставляется в крупку путем диффузии при переменной температуре, определяемой режимом разваривания, и при отрыве набухших крахмальных гранул с наружных слоев частицы. В этой связи коэффициенты диффузии определены путем моделирования процесса двухступенчатого разваривания кукурузной крупки размером 1 мм по производственным данным спиртзавода ООО «Стандарт Спирт» (Кабардино-Балкарская республика, г. Нарткала). Моделирование проведено по математической модели разваривания зернового замеса, изложенной в [6] и основанной на уравнении нестационарной диффузии, решение которого проведено методом сеток по неявной схеме. Модель

учитывает концентрационные, температурные зависимости и эффект отрыва набухших крахмальных слоев. Параметром идентификации являлась энергия активации в зависимости коэффициента диффузии влаги в частице крупки от температуры в соответствии с уравнением Аррениуса. Энергия активации составила 22,412 кДж/моль. Значения коэффициентов диффузии влаги в частице крупки на I-й и II-й ступенях составили, соответственно: $D_I = 8,70 \cdot 10^{-12}$ м²/с при $t = 145$ °С и $D_{II} = 4,48 \cdot 10^{-12}$ м²/с при $t = 106$ °С [7]. Значения коэффициентов диффузии нанесены на рисунок 3 в виде красных квадратных точек.

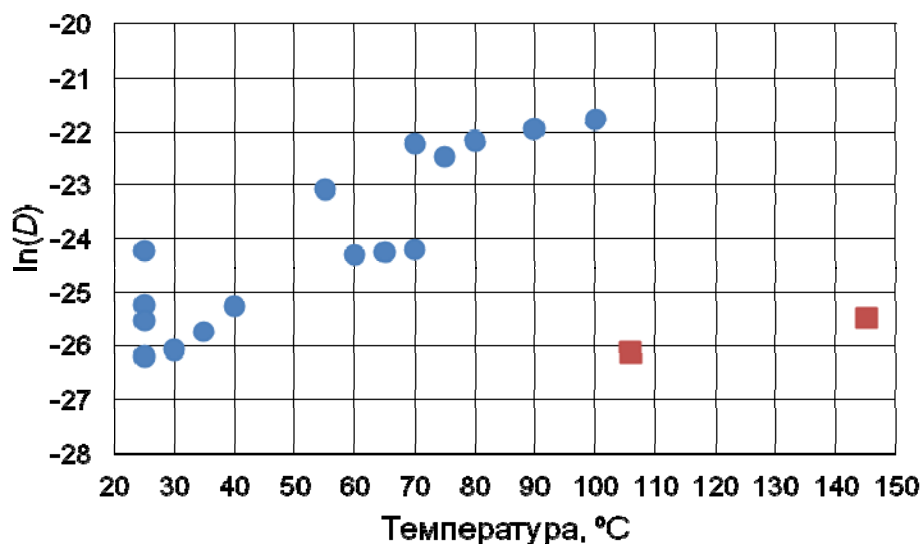


Рисунок 3 – Зависимость $\ln(D)$ от температуры

Графическая зависимость $\ln(D)$ от температуры свидетельствует о том, что при высоких температурах величина коэффициента диффузии при насыщении крупки влагой снижается. Причиной этого является изменение структуры крахмальных гранул под воздействием высоких температур.

Литература

1. Ruiz-Gutiérrez M.G., Quintero-Ramos A., Meléndez-Pizarro C.O., Lardizábal-Gutiérrez D., Barnard J., Márquez-Melendez R., Talamás-Abbud R. Changes in mass transfer, thermal and physicochemical properties during

nixtamalization of corn with and without agitation at different temperatures. Journal of Food Engineering 98 (2010) 76-83.

2. ASBI B. ALI and J. LAMB Changes in Moisture Content of Corn Starch during Pneumatic Conveying // PERTANIKA Journal 14(3),237-241 (1991).

3. K. Muthukumarappan, S. Gunasekaran MOISTURE DIFFUSIVITY OF CORN KERNE COMPONENTS DURING ADSORPTION // American Society of Agricultural Engineers VOL. 37(4): 1263-1268.

4. DOYMAZ, I.; PALA, M. The thin-layer drying characteristics of corn. Journal of Food Engineering, v. 60, n. 2, p. 173-179, 2003.

5. Ajala, A.S. Ajala, F.A. and Tunde Akintunde, T.Y. Study on Drying Kinetics of Fermented Corn Grains // Food Science and Quality Management Vol 5, 2012. P.10-18.

6. Константинов Е.Н., Короткова Т.Г., Ксандопуло С.Ю., Черепов С.В. Разработка модели разваривания зернового замеса // Вестник ВГУИТ, 2014. № 1. С. 40-46.

7. Константинов Е.Н., Ксандопуло С.Ю., Короткова Т.Г., Черепов С.В., Кривова О.А. Математическое моделирование разваривания кукурузной крупки и ректификации бражки [Электронный ресурс] // Научные труды КубГТУ: электрон. сетевой политематич. журн. 2014. № 1. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/9> (дата обращения: 15.05.2014).

REFERENCES

1. Ruiz-Gutiérrez M.G., Quintero-Ramos A., Meléndez-Pizarro C.O., Lardizábal-Gutiérrez D., Barnard J., Márquez-Melendez R., Talamás-Abbud R. Changes in mass transfer, thermal and physicochemical properties during nixtamalization of corn with and without agitation at different temperatures. Journal of Food Engineering 98 (2010) 76-83.

2. ASBI B. ALI and J. LAMB Changes in Moisture Content of Corn Starch during Pneumatic Conveying // PERTANIKA Journal 14(3),237-241 (1991).

3. K. Muthukumarappan, S. Gunasekaran MOISTURE DIFFUSIVITY OF CORN KERNE COMPONENTS DURING ADSORPTION // American Society of Agricultural Engineers VOL. 37(4): 1263-1268.

4. DOYMAZ, I.; PALA, M. The thin-layer drying characteristics of corn. Journal of Food Engineering, v. 60, n. 2, p. 173-179, 2003.

5. Ajala, A.S. Ajala, F.A. and Tunde Akintunde, T.Y. Study on Drying Kinetics of Fermented Corn Grains // Food Science and Quality Management Vol 5, 2012. P.10-18.

6. Konstantinov E.N., Korotkova T.G., Ksandopulo S.Ju., Cherepov S.V. Razrabotka modeli razvarivaniya zernovogo zamesa // Vestnik VGUIT, 2014. № 1. S. 40-46.

7. Konstantinov E.N., Ksandopulo S.Ju., Korotkova T.G., Cherepov S.V., Krivova O.A. Matematicheskoe modelirovanie razvarivaniya kukuruznoj krupki i rektifikacii brazhki [Jelektronnyj resurs] // Nauchnye trudy KubGTU: jelektron. setevoj politematich. zhurn. 2014. № 1. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/9> (data obrashhenija: 15.05.2014).

Поступила 10.06.14 г.

MODELING OF COOKING CORN GRITS

**T.G. KOROTKOVA¹, A.A. SHALJAHOV², H.R. SIJUHOV²,
S.V. CHEREPOV²**

¹ *Kuban State Technological University,
350072, Russian Federation, Krasnodar, 2, Moskovskaya str.;*
e-mail: korotkova1964@mail.ru

² *Maikop State Technological University,
352700, Russian Federation, Maikop, 191, Pervomaiskaya str.;*
e-mail: siukhov@mail.ru

The analysis of the published data on the diffusion coefficient of moisture in corn (grain, germ, and starch) obtained by moistening and drying air having a different relative humidity at temperatures ranging from 25 to 100 °C. It is established that values of the diffusion coefficients are in the range of from $3 \cdot 10^{-11}$ m²/s at a temperature of 25 °C to $3,52 \cdot 10^{-10}$ m²/s at a temperature of 100 °C. These diffusion coefficients were obtained by processing the experimental data using the known analytical solutions of nonstationary diffusion in the presentation of the solid material in the form of a ball or plate. At higher temperatures, the data on the diffusion coefficients, unknown. Temperatures above 100 °C are used in high-temperature cooking of grain batch. Data for the two-step cooking of corn grits are taken in this paper on the results of the survey distillery Ltd. "Standard Alcohol" (Kabardino-Balkar Republic, Nartkala). Previously developed and identified for industrial and laboratory data of cooking grain mathematical model used to simulate the mixing process of two-

stage cooking of corn grits with a particle size of 1 mm. The model is based on non-stationary diffusion equation whose solution is carried out by the grid method for the implicit scheme. It takes into account the concentration, temperature dependence, and the effect of the swollen starch separation layers. Shows a graphical depiction of known and own experimental data on the temperature, which suggests that at high temperatures the diffusion coefficient at saturation grits moisture decreases. The reason for this is to change the structure of the starch granules at high temperature of cooking.

Keywords: two stage of cooking, mathematical modeling, corn grits, the diffusion coefficient.