

**ОБОБЩЕНИЕ РАВНОВЕСНЫХ И КИНЕТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ  
ЗЕРНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ЧЕРЕЗ ПОТЕНЦИАЛЫ МАССОПЕРЕНОСА  
КРАХМАЛА**

**С.А. ПОДГОРНЫЙ, Е.П. КОШЕВОЙ, В.С. КОСАЧЕВ**

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

В статье предложены единые равновесная и кинетическая зависимости зерновых материалов (пшеницы, ячменя, кукурузы, риса) через потенциалы массопереноса крахмала.

**Ключевые слова:** потенциал переноса, сушка, математическое моделирование, массоперенос, крахмал.

Равновесные данные в системе «влага – зерно» могут служить основой для определения потенциалов массопереноса [1,2], что необходимо при обосновании процесса сушки [3]. Для описания равновесных данных и связанных с ними термодинамическими параметрами по зерновым материалам проведено ряд работ [4-6]. Использовались для описания некоторые математические модели, среди которых были теоретически обоснованные [7]. Однако, никакое единственное уравнение не дает точные результаты по всему диапазону относительной влажности для всех типов материалов [8].

В данной работе предпринята попытка обобщить определения потенциалов массопереноса в зерновых материалах, во-первых, для пшеницы, а так же ячменя, кукурузы, риса и крахмала, используя результаты работ [9-12]. Описания потенциалов массопереноса унифицированы экспоненциальным уравнением:

$$\Theta(u) = A \cdot \exp(-B \cdot u), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (1)$$

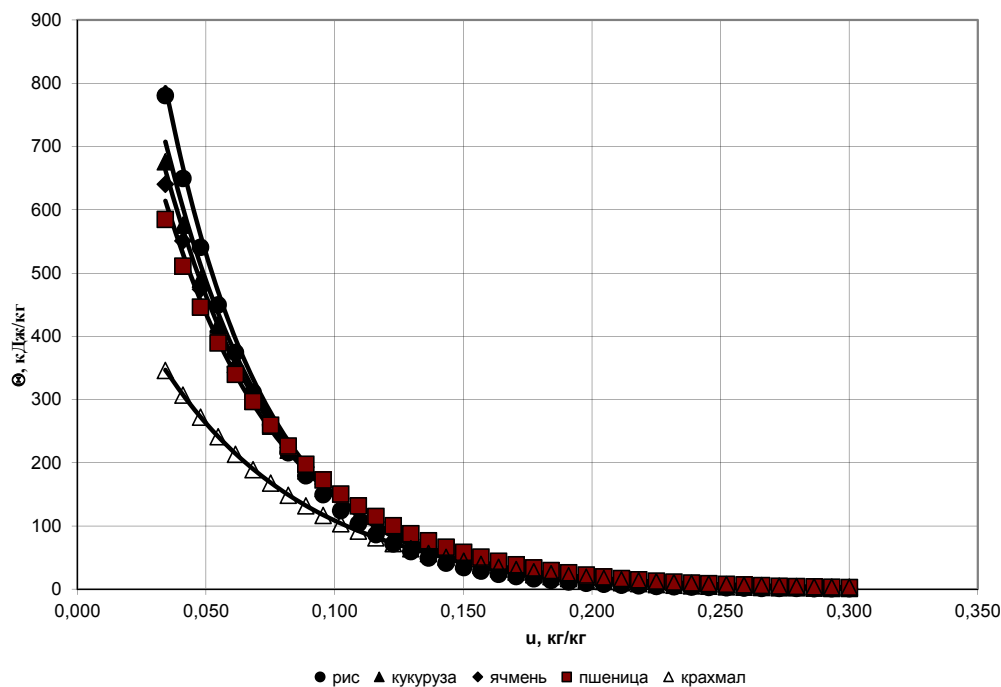
Где  $\Theta$  - потенциал массопереноса, кДж/кг;  $u$  – влагосодержание, кг/кг;  $A$  и  $B$  – постоянные.

На рисунках 1, 2 и таблице 1 представлены данные по потенциалам переноса рассматриваемых зерновых материалов.

Таблица 1. Значения постоянных в зависимостях.

Вид	$c_{кр}, \%$	A	$A^R$	B	$B^R$
Рис	48	1963	1900	26,956	25,5254
Кукуруза	61	1513	1584	23,558	23,5579
Ячмень	67	1359	1438	22,0026	22,6498
Пшеница	73	1155	1292	19,897	21,7417
Крахмал	100	634	634	17,71	17,6553

\*A и B постоянные в зависимостях рисунка 1,  $A^R$  и  $B^R$  – рисунка



2.

Рисунок 1. Зависимости потенциалов переноса рассматриваемых зерновых материалов.

В работе [9] показано, что в злаковых материалах (крахмал, клейковина, мука, зерно, хлеб) связи влаги с материалом определяет основной компонент – крахмал. Приведена для данных материалов единая зависимость энергии связи от активности влаги.

В данной работе предпринята попытка получить единую зависимость потенциалов переноса влаги для зерновых материалов на основе связи с

содержанием крахмала. Исходя из имеющихся данных [Интернет, «Big fermer»], которые показывают диапазон содержания крахмала в зерновых материалах, с учетом высокой степени корреляции зависимости между параметрами А и В

$$B(A) = 0,0071 \cdot A + 12,569 \quad R^2 = 0.97 \quad (2)$$

определили базовые значения концентрации крахмала и определили параметры зависимости потенциалов переноса от содержания крахмала.

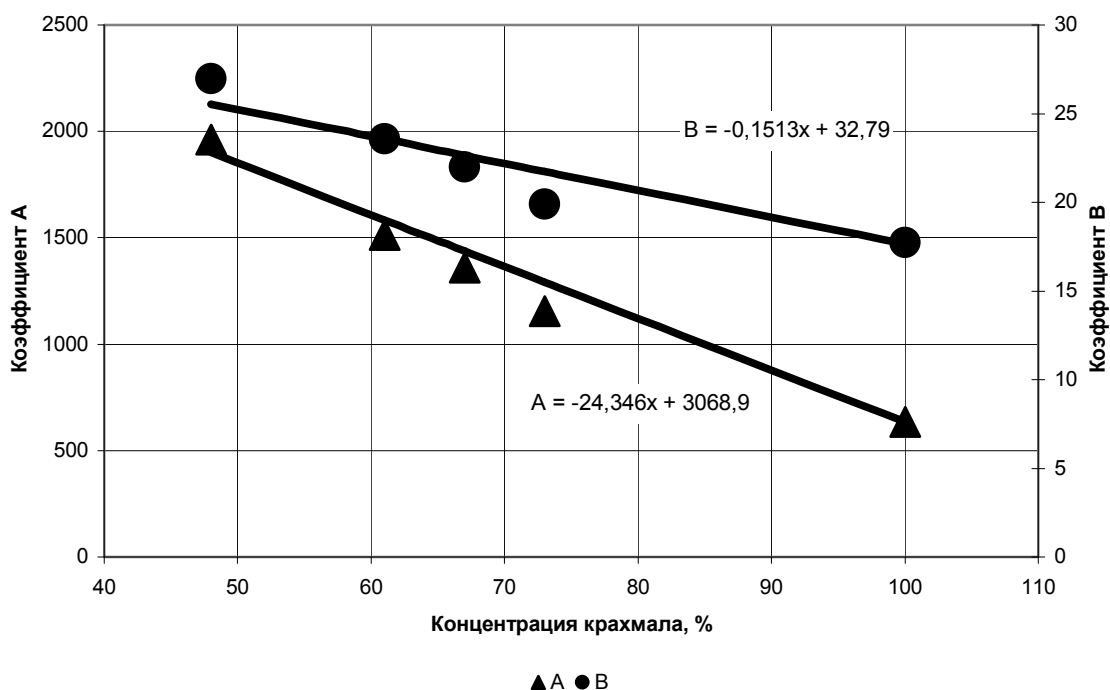


Рисунок 2. Зависимости потенциалов переноса рассматриваемых зерновых материалов от содержания крахмала.

Общая зависимость равновесного потенциала от содержания крахмала

$$\Theta_{\text{равн}}(c_{\text{кр}}) = e^{-0.15134669 \cdot c_{\text{кр}} + 32.79} \cdot (-24.346 \cdot c_{\text{кр}} + 3068.886) \quad (3)$$

Рассмотрим процесс идентификации параметров решения диффузионного кинетического уравнения для задачи нестационарного переноса экспериментального потенциала из высушиваемой частицы. Общий вид решения дифференциального диффузионного уравнения

потенциалопроводности для частиц различной формы можно представить в виде:

$$\Omega = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \exp(-\lambda_i^2 Fo) \quad (4)$$

Где  $\Omega = (M(\tau) - M_e) / (M_0 - M_e)$  – относительный избыточный экспериментальный потенциал зерна в процессе сушки;  $M$ ,  $M_e$  и  $M_0$  – значения влагосодержания зерна через экспериментальный потенциал (индекс «0» означает начальное значение, а «e» - равновесное значение);  $\tau$  - время сушки;  $a_i$  - фактор задержки и  $\lambda_i$ , - собственные значения;  $Fo = D\tau/R^2$  - число Фурье, описывающее безразмерное время [продолжительности] процесса,  $D$  - коэффициент диффузии (потенциалопроводности),  $R$  – характерный размер частицы.

В уравнении (4) фактор задержки  $a_i$  и собственные значения  $\lambda_i$  зависят от числа Био  $Bi$ , которое представляет отношение сопротивлений внутренних против внешних потенциалопроводностей.

Использование уравнение (4) с бесконечным рядом членов представляет практические неудобства, а если использовать только один член ряда, то уравнение не описывает начальную часть кривой для  $Fo < 0.3$ .

В работе [10] на основе анализа предложили зависимость, описывающую кинетику во всем диапазоне времени и использующую один член ряда для среднего значения.

$$\Omega = a_{m,1} \cdot \exp(-\lambda_1^2 \cdot Fo) - (a_{m,1} - 1) \cdot Bi^{-3\lambda_1 \cdot Fo} \cdot \exp(-C \cdot Fo) \quad (5)$$

Где  $a_{m,1}$ ,  $\lambda_1 = \lambda_1 R^2 / D$ ,  $Bi$ ,  $C$  – параметры кинетического уравнения.

Идентификация параметров диффузионного кинетического уравнения сушки проведена через потенциал массопереноса по экспериментальным данным [11].

Процесс сушки зерновых материалов описывали на основе кинетических данных относительного изменения потенциала во времени сушки. Поиск

кинетических параметров уравнения осуществлялся минимизацией суммы квадратов отклонений кинетической кривой определяемой по уравнению (5), в котором обобщенное время  $F_0$  заменено текущим временем  $\tau$  и экспериментальными данными изменения относительного потенциала.

Анализируя полученные регрессионные зависимости  $\lambda_1$  для различных зерновых материалов, обработанных по общей формуле

$$\lambda_1 = b_1 \cdot \exp(a_1 \cdot t) + b_2 \cdot \exp(a_2 \cdot t) \cdot \ln(w_0) \quad (6)$$

установили (Таблица 2), что первое слагаемое имеет совпадающие коэффициенты и не зависит от вида зернового материала, а коэффициенты второго слагаемого зависят от вида зернового материала. Это отличие связываем с концентрацией крахмала. На рисунке 3 представлены корреляционные зависимости коэффициентов  $a_2$  и  $b_2$  от концентрации крахмала.

Таблица 2. Значения коэффициентов в зависимости (3) для  $\lambda_1$  для различных видов зерна, отличающихся содержанием крахмала.

	$a_1$	$b_1$	$a_2$	$b_2$	$c_{кр}, \%$
Рис	-16,582679	0,777446	0,078698	-3,229E-07	48
Кукуруза	-16,582679	0,777446	0,022555	-1,928E-03	61
Пшеница	-16,582679	0,777446	0,017478	-3,907E-03	73

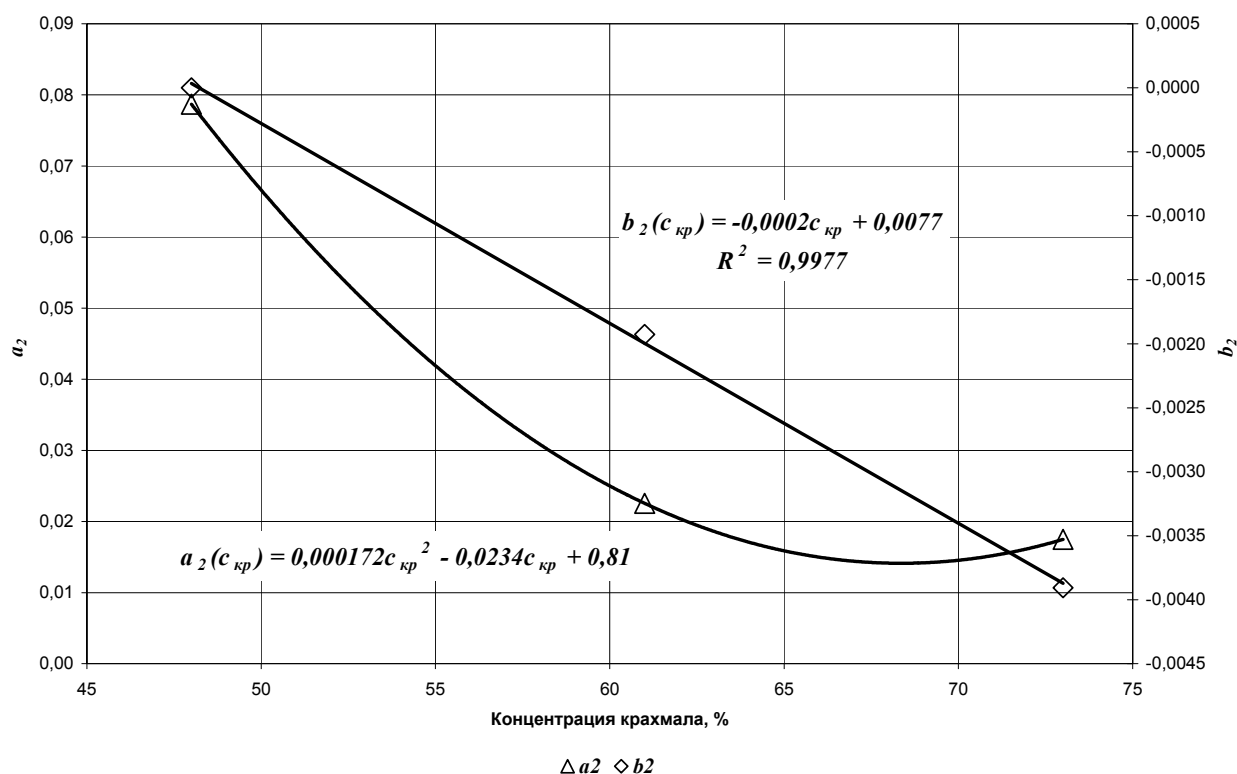


Рисунок 3. Корреляционные зависимости коэффициентов  $a_2$  и  $b_2$  от концентрации крахмала.

### ВЫВОД

Предложены единые равновесная и кинетическая зависимости зерновых материалов от концентрации крахмала.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков А.В. Теория сушки. - М.: Энергия, 1968.-472с.
2. Никитина Л.М. Таблицы равновесного удельного влагосодержания и энергии связи влаги с материалами. М.-Л., Госэнергоиздат, 1963.-176 с.
3. Гинзбург А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. - М.: Агропромиздат, 1985.-336с.
4. Никитина Л.М. Термодинамические характеристики переноса вещества некоторых зерновых культур. Доклады АН БССР, т.3, №4, 1959.
5. Красников В.В. Термодинамические характеристики массопереноса некоторых зерновых культур. Известия ВУЗов «Пищевая технология» 1964, №3, с.127-131.

6. Гинзбург А.С., Савина И.М. Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1982.- 280 с.

7. Подгорный С.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С., Зверев С.В. Статистическая оценка кластерной модели гигроскопичности зерна. Хранение и переработка сельхозсырья. 2011, №6, с.11-14.

8. Подгорный С.А., Косачев В.С., Кошевой Е.П. Определение параметров математической модели равновесных свойств зерна в гигроскопической области нелинейной оптимизацией. Известия ВУЗов «Пищевая технология», 2010, №5-6, с.84-86.

9. Егоров Г.А., Щеголева А.И. Водоудерживающая способность крахмала и клейковины пшеничной муки. Известия ВУЗов «Пищевая технология», 1980, №5, с.46-48.

10. Christensen, M.G. Simplified equations for transient heat transfer problems at low Fourier numbers / M. G. Christensen, J. Adler-Nissen // Applied Thermal Engineering. – 2015. – № 76. – P. 382-390.

11. Jittanit W. Modelling of seed drying using a two-stage drying concept / W. Jittanit // A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. School of Chemical Sciences and Engineering. The University of New South Wales. – 2007. – P. 32–37.

#### REFERENCES

1. Lykov A.V., M.: Jenergija, 1968, 472 p. Teorija sushky (Theory of drying).
2. Nikitina L.M., M.-L.: Gosenergoizdat, 1963, 176 p. Tablicy ravnovesnogo udelnogo vlagosoderzhaniya i energii svyazi vlagi s materialamy (Tables of equilibrium specific moisture content and energy binding moisture and materials).
3. Ginzburg A.S., M.: Agropromizdat, 1985, 336 p. Raschet i proektirovaniye sushilnih ustanovok pischevoy promishlennosti (Calculating and designing drying equipment in food industry).
4. Nikitina L.M., Doklady AN BSSR, t.3, № 4, 1959. Termodinamicheskiye harakteristiki perenosa veschestva nekotoryh zernovykh kultur (Thermodynamic properties of mass transfer of some grain crops).

5. Krasnikov V.V., *Izvestija VUZov: Pischevaja tehnologija*, 1964, № 3, pp. 127-131. Termodinamicheskiye harakteristiki massoperenosa nekotoryh zernovih kultur (Thermodynamic properties of mass transfer of some grain crops).

6. Ginzburg A.S., Savina I.M., M.: *Legkaja i pishhevaja promyshlennost'*, 1982, 280 p. Massovlagoobmennye harakteristiki pishhevyyh produktov (Mass and moisture exchange characteristics of food products).

7. Podgornyj S.A., Koshevoj E.P., Kosachev V.S., Zverev S.V., *Hranenije i pererabotka selhozsirija*, 2011, №6, pp.11-14. Statisticheskaja ocenka klasternoj modely gigroskopichnosti zerna (Statistical estimation of grain hygroscopicity cluster model).

8. Podgornyj S.A., Kosachev V.S., Koshevoj E.P., *Izvestija VUZov Pishhevaja tehnologija*, 2010, №5-6, pp. 84-86. Opređenje parametrov matematicheskoy modely ravnovesnih svojstv zerna v gigroskopicheskoy oblasti nelinejnoj optimizacii (Defining parameters of the mathematical model for equilibrium grain properties in the hygroscopic area using nonlinear optimization).

9. Egorov G.A., Schegoleva A.I., *Izvestija VUZov Pishhevaja tehnologija*, 1980, №5, pp.46-48. Vodouderzhivajuschaja sposobnost' krahmala i klejkoviny pshenichnoj muky (Water-holding capacity of starch and wheat flour gluten).

10. Christensen, M.G. Simplified equations for transient heat transfer problems at low Fourier numbers / M. G. Christensen, J. Adler-Nissen // *Applied Thermal Engineering*. – 2015. – № 76. – P. 382-390.

11. Jittanit W. Modelling of seed drying using a two-stage drying concept / W. Jittanit // A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. School of Chemical Sciences and Engineering. The University of New South Wales. – 2007. – P. 32–37.

*SUMMARISING EQUILIBRIUM AND KINETIC DEPENDENCES OF GRAIN MATERIALS USING MASS TRANSFER POTENTIALS OF STARCH*

**S.A. PODGORNYY, E.P. KOSHEVOY, V.S. KOSACHEV**

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



The article puts forward united equilibrium and kinetic dependences of grain materials (wheat, barley, maize, rice) using mass transfer potentials of starch.

**Key words:** transfer potential, drying, mathematical modeling, mass transfer, starch.