

УДК 664.834

Гришин М.А.<sup>1</sup>,  
Потапов В.А.<sup>2</sup>, Погожих Н.И.<sup>2</sup><sup>1</sup>Одесская национальная академия пищевых технологий<sup>2</sup>Харьковский государственный университет питания и торговли

## УТОЧНЕННОЕ УРАВНЕНИЕ ПРИВЕДЕННОЙ СКОРОСТИ СУШКИ

Запропоновано уточнений вираз для функції приведеної швидкості сушіння в кінетичному рівнянні Г.К. Філоненка.

Предложено уточненное выражение для функции приведенной скорости сушки в кинетическом уравнении Г.К.Филоненко.

We propose a refined expression for the function of effective drying rate in Filonenko's kinetic equation.

$A_1, A_2, B, m$  – эмпирические коэффициенты;  
 $N_w$  – скорость сушки постоянного периода;  
 $w$  – влагосодержание;  
 $\varepsilon$  – относительная погрешность;  
 $\tau$  – текущее время;

$\Psi_w$  – приведенная скорость сушки.

**Индексы:**

$k$  – критическое значение;

$\infty$  – равновесное значение при  $\tau \rightarrow \infty$ ;

\* – безразмерная величина.

Первой работой, давшей научное обоснование эмпирическому методу описания кинетики сушки, очевидно, следует считать книгу Г.К.Филоненко “Кинетика сушильного процесса” [1]. Он открыл важную кинетическую закономерность – скорость сушки во втором периоде однозначно связана с постоянной скоростью сушки в первом периоде. Плодотворность идеи состояла во введении понятия приведенной скорости сушки, которая представляет собой отношение скорости сушки при данном влагосодержании материала к максимальной скорости постоянного периода:

$$\Psi_w = -\frac{1}{N_w} \frac{dw}{d\tau} \quad (1)$$

Из обобщения большого количества экспериментальных данных было получено следующее выражение для приведенной скорости сушки:

$$\Psi_w(w) = \frac{(w - w_\infty)^m}{A_1 + A_2(w - w_\infty)^m} \quad (2)$$

Из уравнений (1,2) получают кинетическую кривую сушки во втором периоде ( $w_k > w \geq w_\infty$ )

$$\tau(w) = \frac{1}{N_w} \int_{w_k}^w \left[ \frac{A_1}{(w - w_\infty)^m} + A_2 \right] dw \quad (3)$$

Однако уравнение (2), записанное в таком виде не удовлетворяет физическому условию непрерывности процесса, то есть отсутствию скачков скорости сушки в точке критического влагосодержания.

Действительно, коэффициенты  $A_1, A_2$  определяются по регрессии точек кривой сушки, отнесенных исследователем ко второму периоду, то есть укладываемых на линеализованное уравнение, имеющее две степени свободы  $A_1, A_2$ :

$$\tau = A_1 f_1(w - w_\infty) + A_2 f_2(w - w_\infty) \quad (4)$$

где вид функций  $f_1, f_2$  определяется интегралом (3) при фиксированных значениях  $m = 0,5; 1; 2$ . Поэтому коэффициенты  $A_1, A_2$ , минимизируя отклонения точек кривой второго периода сушки от регрессионного уравнения (4), не обязательно обеспечивают значение критического влагосодержания. Для того чтобы скорость второго периода сушки в точке критического влагосодержания

Таблица Сравнение результатов регрессионной обработки кинетики сушки картофеля трехпараметрическим и двухпараметрическим уравнениями

Температура сушки, °C	Трехпараметрическое уравнение				Двухпараметрическое уравнение		
	Коэффициенты			Относительная погрешность ε, %	Коэффициенты		Относительная погрешность ε, %
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	m		B	m	
50	361,4	-1,45	1	4,6	1,08	1,28	3,2
60	220,4	0,32	1	6,9	1,05	1,01	7,0
70	294,8	-0,53	1	2,6	0,46	1,43	1,7
80	220,4	-0,45	1	6,8	0,37	1,47	4,2
90	263,0	0,73	1	11,0	19,97	0,15	12,5
100	276,5	-0,77	1	3,7	20,43	0,14	6,2
105	450,2	-0,23	1	17,8	92,24	0,05	13,1
110	281,6	0,65	1	23,9	82,78	0,05	16,2
115	583,5	-0,49	1	4,5	70,14	0,1	8,6

ния равнялась скорости первого периода сушки, должно выполняться условие

$$\psi_w(w_k) = 1 \quad (5)$$

Откуда с учетом (2) получаем связь между коэффициентами A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>

$$A_2 = 1 - A_1(w_k - w_\infty)^{-m} \quad (6)$$

Подставляя (6) в (2), получаем двухпараметрическое уравнение приведенной скорости сушки

$$\psi_w(w) = \frac{(w - w_\infty)^m}{A_1 \left[ 1 - \left( \frac{w - w_\infty}{w_k - w_\infty} \right)^m \right] + (w - w_\infty)^m} \quad (7)$$

Легко убедиться, что при w = w<sub>k</sub>, ψ<sub>w</sub> = 1. Уравнение (7) можно записать в более компактном виде, если ввести безразмерное влагосодержание и безразмерную приведенную скорость сушки по соотношениям (9), (10)

$$\psi_*(w_*) = \frac{w_*^m}{B + (1 - B)w_*^m} \quad (8)$$

$$w_* = \frac{w - w_\infty}{w_k - w_\infty} \quad (9)$$

$$\psi_* = \frac{(w_k - w_\infty) dw_*}{N_w d\tau} \quad (10)$$

где введенный эмпирический коэффициент B связан с коэффициентом A<sub>1</sub> следующим образом:

$$B = \frac{A_1}{(w_k - w_\infty)^m} \quad (11)$$

Уравнение (8) по форме полностью соответствует уравнению Г.К. Филоненко, но является двухпараметрическим, при этом в отличие от (2) интегрируется при любых значениях коэффициента m:

при m ≠ 1

$$\tau = \frac{(w_k - w_\infty)}{N_w} \left\{ B \left[ \left( 1 - \frac{w_*^{-m}}{1 - m} \right) w_* + \frac{m}{1 - m} \right] + 1 - w_* \right\} \quad (12)$$

при m = 1

$$\tau = \frac{(w_k - w_\infty)}{N_w} \{ B [w_* - 1 - \ln(w_*)] + 1 - w_* \} \quad (13)$$

Уравнения (12), (13), как и (3), описывают кинетику второго периода сушки и позволяют при заданном значении m определять кинетический коэффициент B. Эти уравнения очень удобны для проведения регрессионного анализа — иско-

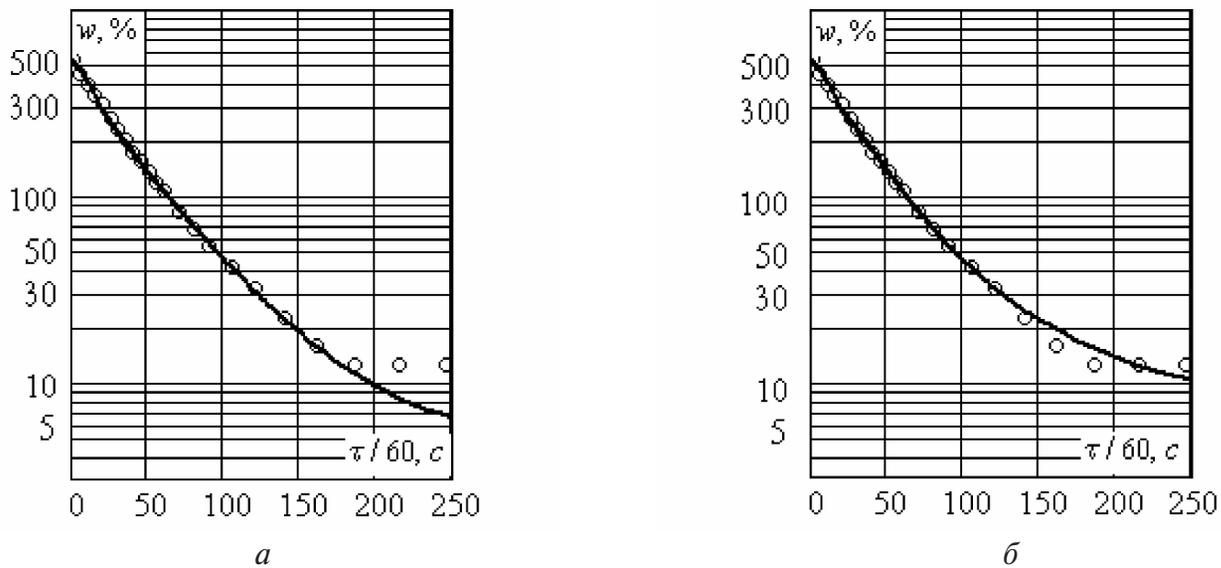


Рис. 1. Аппроксимация кинетики сушки картофеля трехпараметрическим (а) и двухпараметрическим уравнениями (б).

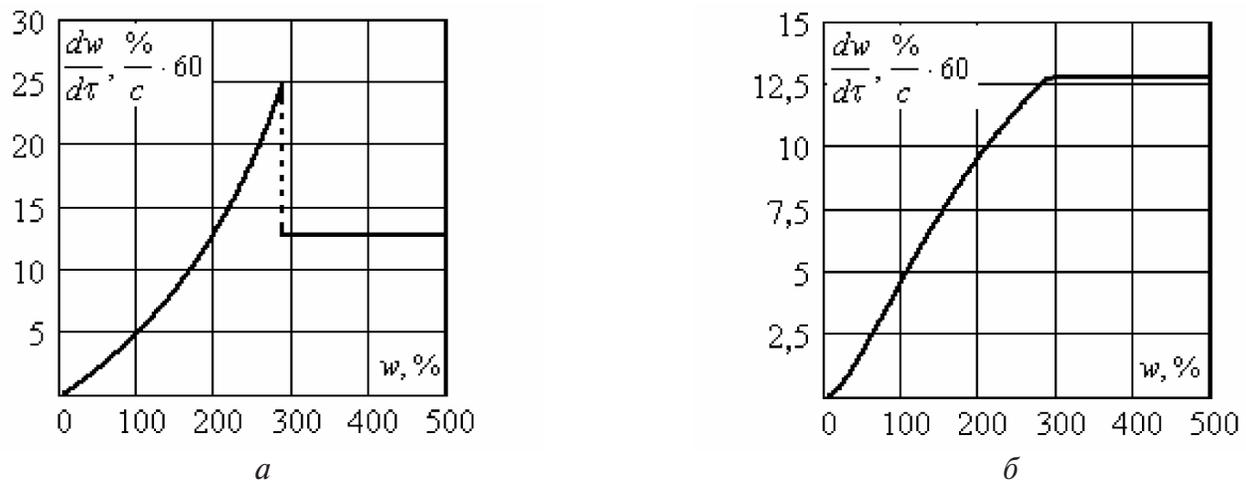


Рис. 2. Расчетная скорость сушки картофеля на основе двух (а) и трехпараметрического (б) уравнений приведенной скорости сушки.

мый кинетический параметр  $B$  является угловым коэффициентом прямой линии, описываемой уравнениями (14) и (15)

при  $m \neq 1$

$$\frac{N_w}{w_k - w_\infty} \tau + w_* - 1 = B \left[ \left( 1 - \frac{w_*^{-m}}{1-m} \right) w_* + \frac{m}{1-m} \right], \quad (14)$$

при  $m = 1$

$$\frac{N_w}{w_k - w_\infty} \tau + w_* - 1 = B [w_* - 1 - \ln(w_*)]. \quad (15)$$

Еще одно преимущество полученных уравнений приведенной скорости сушки заключается в том, что они могут повысить точность аппроксимации кинетических кривых, поскольку допускают произвольное варьирование кинетического параметра  $m$ , который, согласно [1], в уравнениях (2) и (8) отражает энергию связи влаги с материалом.

В таблице приведены результаты регрессионной обработки кинетики конвективной сушки кубиков картофеля размером  $8 \times 8 \times 8$  мм по двум уравнениям (2) и (8). Как видно из представленных данных, несмотря на меньшее число степе-

ней свободы, двухпараметрическое уравнение в среднем дает меньшую погрешность, чем трехпараметрическое. Следует также отметить, что уменьшение величины коэффициента  $m$  с повышением температуры хорошо согласуется с общеизвестным фактом уменьшения энергии связи влаги с материалом при его нагревании.

Пример аппроксимации кривых кинетики сушки картофеля при температуре 70 °С трех и двухпараметрическим уравнениями приведен на рис. 1. На рис. 2 приведена рассчитанная по уравнениям (2) и (8) скорость сушки для этого эксперимента. Как видно, в точке критического влагосодержания погрешность определения скорости

сушки на основе трехпараметрического уравнения достигает 200%.

### **Вывод**

Для более корректного анализа кинетики процесса сушки следует применять уточненное уравнение приведенной скорости сушки.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Филоненко Г.К. Кинетика сушильного процесса.— М.: Оборонгиз, 1939.— 138 с.

*Получено 26.01.2006 г.*