

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2026-25-3-253-261>

УДК 66.047.7

Кинетика теплообмена и температура в процессе сушки тонких влажных материалов

Канд. техн. наук, доц. А. И. Ольшанский¹⁾, А. Н. Голубев¹⁾

¹⁾Витебский государственный технологический университет (Витебск, Республика Беларусь)

Реферат. Изложено исследование кинетики теплообмена по экспериментальным данным влагообмена тонких плоских керамических, асбестовых и войлочных влажных пластин на основе уравнения кинетики сушки. Исследование процесса сушки проводилось при температуре 90, 120, 150 °С и скорости воздуха 3, 5, 10 м/с. Установлены связи между влаго- и теплообменом с использованием уравнения кинетики сушки, числа Ребиндера и температурного коэффициента сушки. Определены уравнения для плотности тепловых потоков для второго периода на основе относительной скорости сушки, уравнения для расчета средних температур в периоде падающей скорости сушки на основе температурного коэффициента сушки и отношения ее времени по периодам. Установлены связи между комплексными переменными, между отношениями времени сушки по периодам и текущего влагосодержания к критическому. Показано, что перекрестная обработка экспериментальных данных по сушке конкретных материалов позволяет определить критическое влагосодержание материалов. Представлен метод обработки экспериментальных данных, позволяющий определять критическое влагосодержание материала, опытных кривых сушки для керамики, асбеста, войлока при разных режимах. Приведена формула для определения относительной скорости сушки как функции отношения текущего влагосодержания к критическому. Приведены результаты расчетов значений плотностей тепловых потоков, относительной скорости и среднеинтегральных температур для периода падающей скорости в процессах сушки керамики, асбеста и войлока, сопоставление расчетных значений с экспериментальными. Погрешность в значениях находится в зоне ошибки обработки экспериментальных данных.

Ключевые слова: влагосодержание, температура, относительная скорость сушки, плотность потока теплоты, число Ребиндера, температурный коэффициент сушки, критическое влагосодержание

Для цитирования: Ольшанский, А. И. Кинетика теплообмена и температура в процессе сушки тонких влажных материалов / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // *Наука и техника*. 2026. Т. 25, № 3. С. 253–261. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2026-25-3-253-261>

Heat Transfer Kinetics and Temperature During the Drying Process of Thin, Wet Materials

A. I. Ol'shanskii, A. N. Golubev¹⁾

¹⁾Vitebsk State Technological University (Vitebsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents a study of the kinetics of heat transfer using experimental data on the moisture exchange of thin flat ceramic, asbestos and felt wet plates based on the drying kinetics equation. The drying process was studied at a temperature of 90, 120, 150 °C and an air speed of 3, 5, 10 m/s. The relationships between moisture and heat exchange were established based on the drying kinetics equation, the Reh binder number and the drying temperature coefficient. Based on

Адрес для переписки

Голубев Алексей Николаевич
Витебский государственный технологический университет
просп. Московский, 72,
220035, г. Витебск, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 112-79-25
tm@vstu.by

Address for correspondence

Golubev Aleksei N.
Vitebsk State Technological University
72, Moskovsky Ave.,
220035, Vitebsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 112-79-25
tm@vstu.by

the relative drying rate, equations for the heat flux density for the second drying period are established. Equations for the heat flux density for the second drying period based on the relative drying rate, equations for calculating average temperatures in the period of decreasing drying rate based on the drying temperature coefficient and the ratio of drying time by drying periods are determined. Relationships were established between complex variables, between the ratios of drying time by periods and the current moisture content to the critical one. It is demonstrated that cross-processing of experimental data on drying of specific materials allows to determine the critical moisture content of materials. A method for processing experimental data is presented for determining the critical moisture content of the material, experimental drying curves for ceramics, asbestos, and felt under different drying conditions. A formula is presented for determining the relative drying rate as a function of the ratio of the current moisture content to the critical one. The results of calculating heat flux densities, relative drying rates and average integral temperatures for the period of decreasing drying rate in the drying processes of ceramics, asbestos, and felt are presented, and a comparison of the calculated values with experimental data is provided. The error in the values lies within the error zone of the experimental data processing.

Keywords: moisture content, temperature, relative drying rate, heat flux density, Reh binder number, drying temperature coefficient, critical moisture content

For citation: Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. (2026) Heat Transfer Kinetics and Temperature During the Drying Process of Thin, Wet Materials. *Science and Technique*. 25 (3), 253–261 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2026-25-3-253-261>

Введение

Процессы сушки связаны с высокими энергозатратами, которые вызваны значительной теплотой парообразования воды при атмосферном давлении. При испарении 1 кг влаги из материала затрачивается 2350 кДж теплоты, что в 5 раз больше, чем на нагрев воды до 100 °С, и в 8 раз больше, чем на нагрев сухого материала до 200 °С. Поэтому выбор теплового режима сушки, типа аппарата, вида теплоносителя для сушки конкретного материала влияет на энергоэффективность работы установки, расход энергии на сушку и качество обрабатываемого материала.

Теплообмен и температура при конвективной сушке

Основное уравнение кинетики сушки А. В. Лыкова представим в безразмерном виде [1–4]

$$q^* = \frac{q_{II}}{q_I} = N^*(1 + Rb), \quad (1)$$

где q_I и q_{II} – плотности тепловых потоков в первом и втором периодах сушки; N^* – относительная скорость сушки, Rb – число Ребиндера.

Число $Rb = bc_{вл}/r$ – центральная характеристика кинетики теплообмена в процессе сушки [1–5], где $b = d\bar{t}/d\bar{u}$ – температурный коэффициент сушки; $c_{вл}$ – удельная теплоемкость влажного тела; r – теплота парообразования. Величина $b = d\bar{t}/d\bar{u}$ является функцией интегрального влагосодержания и важной характеристикой кинетики сушки [1, 3–5]. Число Ребиндера

$$Rb = \frac{c_{вл}}{r} \left(\frac{d\bar{t}}{d\bar{u}} \right) = \frac{c_{вл}b}{r}.$$

Величина Rb зависит от температурного коэффициента сушки b , удельной теплоемкости влажного материала $c_{вл}$ и теплоты парообразования r .

Уравнение (1) устанавливает связь между теплообменом q^* и влагообменом N^* при помощи числа Rb и позволяет описать процесс теплообмена по данным влагообмена [3–6]. При этом не нужно определять коэффициенты теплоотдачи $\bar{\alpha}$, вычисление которых связано с погрешностью при расчете $\bar{\alpha}$ по критериальным уравнениям теории подобия [3, 4, 6]. Выяснение зависимостей $Rb = f(\bar{u})$ и $b = f(\bar{u})$ является необходимым условием для расчета основных кинетических характеристик процесса сушки [4–7].

На рис. 1а даны зависимости $Rb = f(\bar{u})$ для процесса сушки керамики (1), листового асбеста (2) и шерстяного войлока (3) в диапазоне режимов сушки: $t_c = 90$ и 120 °С, скорости воздуха $v = 3; 5; 10$ м/с. Видно, что образуются экспоненциальные кривые, которые описываются уравнением [1, 2, 4, 6, 7]

$$Rb = A \exp(-n(\bar{u} - u_p)). \quad (2)$$

Значения коэффициентов A и n определяются экспериментально и для сушки керамики, асбеста, войлока даны в табл. 1. В процессе сушки с уменьшением влагосодержания \bar{u} величина Rb снижается. При $\bar{u} \approx u_p$ число $Rb = A$ [1, 2, 4].

Таблица 1

Значения коэффициентов в расчетных формулах в процессах сушки керамики, асбеста и войлока
 Values of coefficients in calculation formulas in the processes of drying ceramics, asbestos and felt

Материал	A	n	β	m_0	D_0	Ψ	Z	Z_0
Керамика	0,4	20	0,080	16	1240	0,5	0,55	1,8
Асбест	0,25	15	0,075	14	1120	0,39	0,45	2,2
Войлок	0,33	6	0,090	8	580	0,14	0,64	1,5

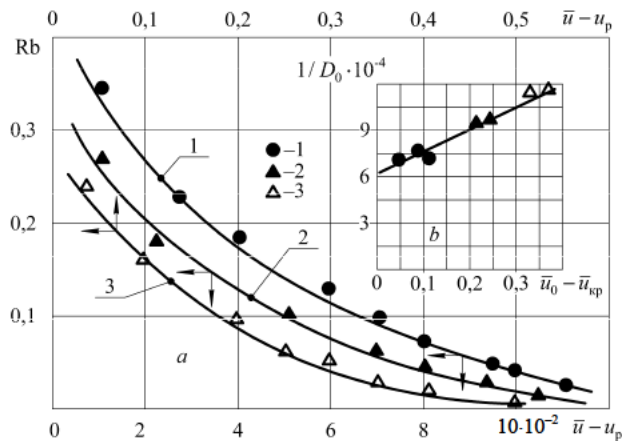


Рис. 1. Зависимость числа Ребиндера от влагосодержания \bar{u} в процессах сушки пластин керамики (1), асбеста (2), войлока (3) для режимов сушки: $t_c = 90$ и 120 °С, скорость воздуха $v = 3, 5$ и 10 м/с (а); зависимость коэффициента D_0 от влагосодержания $\bar{u}_0 - \bar{u}_{cp}$ для данных материалов (б)

Fig. 1. Dependence of the Reh binder number on the moisture content \bar{u} in the drying processes of ceramic plates (1), asbestos (2), felt (3) for drying modes: $t_c = 90$ and 120 °С, air speed $v = 3, 5$ and 10 m/s (a); dependence of the coefficient D_0 on the moisture content $\bar{u}_0 - \bar{u}_{cp}$ for these materials (b)

На рис. 2а даны кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ для сушки листового асбеста при температурах $t_c = 90; 120; 150$ °С, скорости воздуха $v = 3$ м/с. Видно, что кривые располагаются эквидистантно (равноудаленно). Температурные коэффициенты сушки $b = d\bar{t} / d\bar{u}$ определяются графическим дифференцированием температурной кривой $\bar{t} = f(\bar{u})$ (рис. 2а) как $\text{tg}(\Delta\bar{t} / \Delta\bar{u}) = b$ [2, 6, 7].

При сушке влажных капиллярно-пористых материалов (керамики, асбеста, войлока, картона, фетра) температурные кривые располагаются близко к параллельным (рис. 2а) и при таком расположении кривых коэффициент сушки b мало зависит от температуры [6–8].

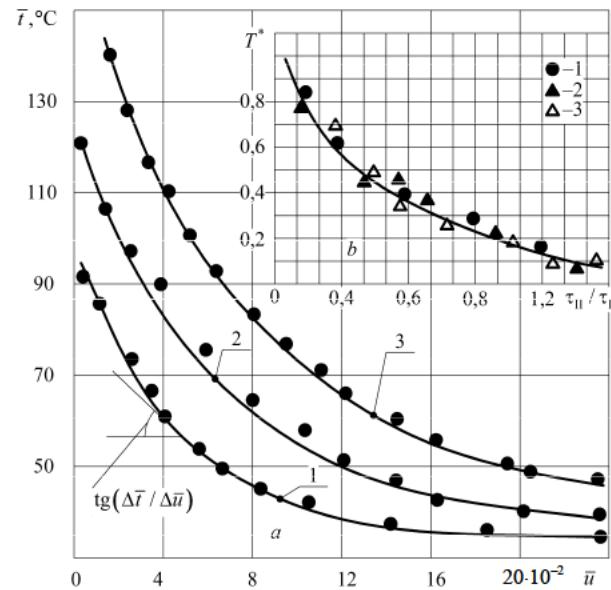


Рис. 2. Температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ в процессах сушки пластин асбеста (а) при режиме: $t_c = 90$ °С (1), $t_c = 120$ °С (2) и $t_c = 150$ °С (3), $v = 3$ м/с; зависимость относительной температуры T^* от отношения времени сушки по периодам τ_{II} / τ_I (б) для сушки керамики, асбеста, войлока (режимы даны на рис. 1)

Fig. 2. Temperature curves $\bar{t} = f(\bar{u})$ in the drying processes of asbestos sheets (a) in the drying mode: $t_c = 90$ °С (1), $t_c = 120$ °С (2) and $t_c = 150$ °С (3), $v = 3$ m/s; dependence of the relative temperature T^* on the ratio of drying time by periods τ_{II} / τ_I (b) for drying ceramics, asbestos, felt (modes are given in Fig. 1)

Экспериментальные исследования В. П. Журавлевой по сушке пористой керамики также подтверждают такое же расположение кривых при различных температурных режимах [8]. Из рис. 2а видно, что касательные к температурам в точках $\text{tg}(\Delta\bar{t} / \Delta\bar{u}) = b$ близки к параллельным и коэффициент $b = d\bar{t} / d\bar{u}$ при данных влагосодержаниях принимает близкие значения [7, 9, 10].

Примеры. Сушка керамической плитки:

$$t_c = 90 \text{ }^\circ\text{C}, \bar{u} = 0,02, b \approx 580 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (при } \bar{t} = 65 \text{ }^\circ\text{C)};$$

$$t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}, \bar{u} = 0,02, b \approx 615 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (при } \bar{t} = 85 \text{ }^\circ\text{C)}.$$

Сушка листового асбеста:

$$t_c = 90 \text{ }^\circ\text{C}, \bar{u} = 0,12, b \approx 150 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (при } \bar{t} = 42 \text{ }^\circ\text{C)};$$

$$t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}, \bar{u} = 0,12, b \approx 170 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (при } \bar{t} = 58 \text{ }^\circ\text{C)}.$$

Сушка технического картона:

$$t_c = 90 \text{ }^\circ\text{C}, \bar{u} = 0,3, b \approx 67 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (при } \bar{t} = 67 \text{ }^\circ\text{C)};$$

$$t_c = 110 \text{ }^\circ\text{C}, \bar{u} = 0,3, b \approx 72 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (при } \bar{t} = 84 \text{ }^\circ\text{C)}.$$

В периоде постоянной скорости сушки $b = d\bar{t} / d\bar{u} = 0$ и число $Rb = 0$. При сушке тонких материалов расход теплоты на нагревание влажного тела значительно меньше расхода теплоты на испарение из него влаги и $Rb \ll 1$ [1, 6, 7].

При сушке керамической пластины при влагосодержании $\bar{u} = 0,08$ $Rb \approx 0,08$, при $\bar{u} = 0,02$ (конец процесса сушки) $Rb \approx 0,27$. Это означает, что при $\bar{u} = 0,08$ из расхода теплоты, идущей на испарение, затрачивается на нагрев 8 %, а при $\bar{u} = 0,02$ на нагрев идет 27 % теплоты от подведенной к материалу. Величина числа Rb к концу процесса цикла показывает необходимость прекращения процесса сушки при конечном влагосодержании \bar{u} для избегания пересушивания материала и перерасхода энергии [1, 3, 6, 7, 9].

Пренебрегая величиной числа Rb , при малых его значениях запишем [7]

$$q^* = \frac{q_{II}}{q_I} = N^*. \quad (3)$$

Относительная скорость сушки $N^* \approx \frac{1}{N} \cdot \frac{d\bar{u}}{d\tau}$

не зависит от режима сушки и для конкретного материала является лишь функцией влагосодержания [1–4]. Величина N^* при данном влагосодержании \bar{u} , как следует из обобщенных кривых Г. К. Филоненко [11], численно равна тангенсу наклона кривой в точке \bar{u} к оси $N\tau$, $N^* = f(\text{tg}(\bar{u}, N\tau))$ и, следовательно, не зависит от режима сушки.

В результате обработки многих опытных кривых сушки керамики, войлока, листового асбеста, технического картона и кривых

ее скорости в режимах сушки при температуре $t_c = 90$ и 120 $^\circ\text{C}$ и скорости воздуха 3, 5 и 10 м/с разными способами обработки эксперимента [9, 10, 12, 13] получены следующие уравнения для N^* :

$$N^* \approx \exp \left[-0,24 \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{-1,25} \right]; \quad (4)$$

$$N^* \approx 0,24 \exp \left(1,5 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right); \quad (5)$$

$$N^* \approx \exp(-\beta\tau_{II}). \quad (6)$$

Из уравнения (3) при числе $Rb = 0$ следует, что относительная плотность потока теплоты численно равна

$$q^* = \frac{q_{II}}{q_I} = N^*. \quad (7)$$

Плотность потока теплоты во втором периоде из уравнения (3)

$$q_{II} = q_I N^* = r\rho R_v N N^*, \quad (8)$$

где $r\rho R_v N = q_I$ – плотность потока теплоты в первом периоде; ρ – плотность; $R_v = V / F$ – отношение объема тела к площади поверхности; N – скорость сушки в первом периоде.

Подставляя в (8) уравнения для N^* (4)–(6), получим плотность потока теплоты во втором периоде сушки. Значения q_{II} даны в табл. 2.

Среднеинтегральная температура материала во втором периоде для многих влажных материалов определяется по экспериментальным данным на основе температурного коэффициента сушки $b = d\bar{t} / d\bar{u}$, который находится графическим дифференцированием температурной кривой $\bar{t} = f(\bar{u})$ [1–4] (рис. 2). В периоде постоянной скорости температурный коэффициент скорости сушки $b = d\bar{t} / d\bar{u} = 0$ и число $Rb = 0$. Зависимость $b = f(\bar{u})$ для влажных материалов выражается эмпирическим уравнением [1–5]

$$b = \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}} \approx D_0 \exp(-m_0(\bar{u} - \bar{u}_0)). \quad (9)$$

Таблица 2

Результаты значений плотностей тепловых потоков, относительной скорости сушки керамики, асбеста и войлока и среднеинтегральных температур для периода падающей скорости

Results of heat flux density values, relative drying rates of ceramics, asbestos, and felt and average integral temperatures for the period of decreasing velocity

Пористая керамика. Пластина $100 \times 80 \times 5$ мм; $\rho = 1860$ кг/м ³ ; режим сушки: $t_c = 120$ °С; $v = 3$ м/с; $\varphi = 5$ % $t_{мт} = 49$ °С, $\tau_I \approx 6,5$ мин, $\bar{u}_0 = 0,2$, $\bar{u}_{кр} \approx 0,10$, $u_p = 0$, $N = 2,53 \cdot 10^{-4}$ с ⁻¹ , $q_I = 5000$ Вт/м ²												
\bar{u}	$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}$	τ_{II} , мин экс.	N^* экс.	N^* (4)	N^* (5)	N^* (6)	q_{II} , Вт/м ² (8), (4)	q_{II} , Вт/м ² (8), (5)	q_{II} , Вт/м ² (8), (6)	\bar{t} , °С экс.	\bar{t} , °С (12)	\bar{t} , °С (13)
0,08	0,8	3	0,75	0,78	0,76	0,80	3750	4000	3900	64	63,0	63,5
0,06	0,6	6	0,62	0,58	0,61	0,63	2900	3100	3100	72	71,5	72,7
0,04	0,4	9	0,45	0,46	0,43	0,41	2250	2450	2240	83	81,5	82,5
0,02	0,2	14	0,22	0,23	0,21	0,24	1250	1160	1180	95	97	98,5
Листовой асбест. Пластина $120 \times 100 \times 6$ мм; $\rho = 770$ кг/м ³ ; режим сушки: $t_c = 120$ °С; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ % $t_{мт} = 42$ °С, $\tau_I \approx 9,5$ мин, $\bar{u}_0 = 0,46$, $\bar{u}_{кр} \approx 0,20$, $u_p = 0$, $N = 4,6 \cdot 10^{-4}$ с ⁻¹ , $q_I = 5300$ Вт/м ²												
0,16	0,8	3,0	0,76	0,79	0,75	0,80	4200	4150	4240	50	48,5	50
0,14	0,7	4,5	0,68	0,69	0,69	0,72	3820	3890	3820	53	54,5	52,5
0,12	0,6	6,5	0,62	0,61	0,64	0,63	3270	3580	3480	58	56,5	57,2
0,08	0,4	11,0	0,42	0,39	0,42	0,44	2450	2470	2440	66	66,5	64,5
0,04	0,2	18,5	0,24	0,22	0,25	0,24	1570	1470	1570	83	84,0	84,0
0,02	0,1	24,5	0,12	0,14	0,15	0,13	980	940	920	96	97,5	97,5
Шерстяной войлок. Пластина $180 \times 100 \times 10$ мм; $\rho = 200$ кг/м ³ ; режим сушки: $t_c = 120$ °С; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ % $t_{мт} = 40$ °С, $\tau_I \approx 7,6$ мин, $\bar{u}_0 = 1,14$, $\bar{u}_{кр} \approx 0,75$, $u_p = 0$, $N = 8,5 \cdot 10^{-4}$ с ⁻¹ , $q_I = 3500$ Вт/м ²												
0,6	0,8	2,5	0,74	0,72	0,76	0,74	2590	2650	2570	46	44,5	45,0
0,5	0,67	6,0	0,67	0,65	0,68	0,67	2340	2380	2345	51	51	48,5
0,4	0,54	8,5	0,42	0,42	0,44	0,39	1470	1380	1360	54	53	52,5
0,3	0,40	12,5	0,34	0,35	0,36	0,32	1225	1150	1120	57	56	56,5
0,2	0,27	18,5	0,22	0,20	0,23	0,19	750	680	700	61	62	62,8

Коэффициенты D_0 и m_0 определялись обработкой экспериментов для процессов сушки керамики, асбеста и войлока. На рис. 1b даны результаты обработки для коэффициента D_0 .

Коэффициент D_0 приближенно вычисляется по зависимости

$$D_0 \approx \frac{10^4}{[14,3(\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}) + 6,85]}. \quad (10)$$

Постоянные: $m_0 \approx 16$ – для керамики; $m_0 \approx 14$ – для асбеста; $m_0 \approx 8$ – для войлока.

На рис. 3 представлены зависимости температурного коэффициента сушки $b = f(\bar{u})$ для керамики (1), асбеста (2) и войлока (3).

Запишем для среднеинтегральной температуры $b = f(\bar{u})$ [3, 6, 10]

$$\bar{t}(\bar{u}) = t_c - \int_{u_p}^{\bar{u}} b(\bar{u}) d\bar{u}. \quad (11)$$

Подставляя (9) в (11) и интегрируя в заданных пределах, получим

$$\bar{t}(\bar{u}) = t_c - \frac{D_0}{m_0} \left[1 - \exp(-m_0(\bar{u} - u_p)) \right]. \quad (12)$$

На рис. 2b даны результаты обработки эксперимента в процессах сушки керамики, асбеста и войлока для зависимости относительной температуры $T^* = f(\tau_{II} / \tau_I)$, где τ_I и τ_{II} –

время сушки в первом и втором ее периодах. Зависимость $T^* = f(\tau_{II} / \tau_I)$ (рис. 2b) аппроксимируется уравнением [6, 12]

$$T^* = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{MT}} = \exp\left(-\psi \frac{\tau_{II}}{\tau_I}\right).$$

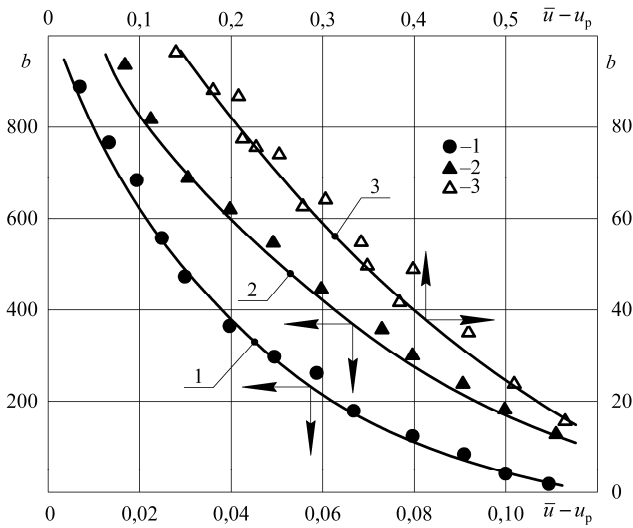


Рис. 3. Зависимость температурного коэффициента $b = d\bar{t}/d\bar{u}$ от влагосодержания \bar{u} в процессах сушки керамики (1), асбеста (2), войлока (3) для режима: $t_c = 120^\circ\text{C}$, скорость воздуха $v = 3\text{ м/с}$

Fig. 3. Dependence of the drying temperature coefficient $b = d\bar{t}/d\bar{u}$ on the moisture content \bar{u} in the drying processes of ceramics (1), asbestos (2), felt (3) for the drying mode: $t_c = 120^\circ\text{C}$, air speed $v = 3\text{ m/s}$

Среднеинтегральная температура во втором периоде

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{MT}) \exp\left(-\psi \frac{\tau_{II}}{\tau_I}\right). \quad (13)$$

Экспериментальные значения коэффициента ψ в процессах сушки керамики, асбеста и войлока даны в табл. 1.

Для установления связи между переменными кинетики сушки даны результаты обработки опытных данных по зависимостям $\tau_{II} / \tau_I \approx f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$ и $N^* \approx f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$. Экспоненциальные зависимости, представленные на рис. 4, описываются уравнениями [6, 12]:

$$\frac{\tau_{II}}{\tau_I} \approx 3,85 \exp\left(-2,5 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right); \quad (14)$$

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \approx 0,4 \ln\left(0,26 \frac{\tau_{II}}{\tau_I}\right); \quad (15)$$

$$N^* \approx \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right)^{1,3}. \quad (16)$$

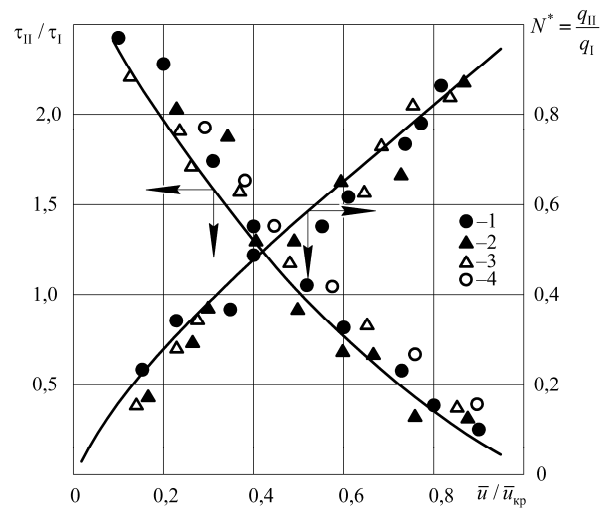


Рис. 4. Зависимости относительной скорости N^* и отношения времени сушки по периодам τ_{II} / τ_I

от относительного влагосодержания $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$ для сушки керамики (1), асбеста (2), войлока (3) и картона (4) (режимы даны на рис. 1)

Fig. 4. Dependences of the relative drying rate N^* and the ratio of drying time by periods τ_{II} / τ_I on the relative moisture content $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$ for drying ceramics (1), asbestos (2), felt (3) and cardboard (4) (the modes are given in Fig. 1)

Уравнения (13), (14) создают условия для инвариантности между переменными кинетики сушки. В табл. 2 даны расчеты по полученным уравнениям и сопоставление вычисленных значений с экспериментом. Погрешность в значениях находится в зоне ошибки обработки экспериментальных данных.

Критическое влагосодержание влажного материала

Влагосодержание материала в точке перехода периода постоянной скорости сушки в

период падающей скорости называют критическим влагосодержанием $\bar{u}_{кр}$, соответствующим гигроскопическому [1–5]. При $\bar{u} < \bar{u}_{кр}$ наступает второй период сушки. Большинство экспериментальных уравнений, определяющих длительность процесса сушки, содержат в качестве неизвестной величины $\bar{u}_{кр}$. Величина $\bar{u}_{кр}$ зависит от ряда параметров кинетики сушки, в первую очередь от ее режима, начального влагосодержания \bar{u}_0 , вида влажного материала, метода подвода теплоносителя [1–6]. Рассмотрим приближенный способ определения $\bar{u}_{кр}$, вытекающий из однозонального метода расчета длительности сушки А. В. Лыкова [14]. На основе экспериментальных данных по сушке капиллярно-пористых материалов [12, 14, 15] и опытных данных Н. С. Михеевой [15] А. В. Лыков приводит простую зависимость для определения $\bar{u}_{кр}$ [14]

$$\bar{u}_{кр} \approx \frac{\bar{u}_0}{Z_0}, \quad (17)$$

где Z_0 – коэффициент, определяемый из графической зависимости $N^* = f(\bar{u} / \bar{u}_0)$. По данным сушки капиллярно-пористых материалов, $Z_0 \approx 1,8$ [1, 15].

В [12] дана обработка опытных данных по сушке керамики, пластин глины, листового асбеста, шерстяного войлока, натуральной кожи в широком интервале изменения режимов сушки для зависимости $N^* = f(\bar{u} / \bar{u}_0)$. Из геометрического анализа этой зависимости следует, что продолжение опытных прямых, полученных обработкой эксперимента для данных материалов, до пересечения с вертикалью при отношении $\bar{u} / \bar{u}_0 = 1$ отсекают отрезки, численно равные следующим значениям: $Z_0 \approx 1,8$ – для керамики и пластин глины; $Z_0 \approx 2,2$ – для листового асбеста; $Z_0 \approx 1,5$ – для войлока; $Z_0 \approx 1,45$ – для натуральной кожи. При этом по оси абсцисс образуются отрез-

ки, равные значениям: $Z = \bar{u}_{кр} / \bar{u}_0 \approx 0,55$ – для керамики; $Z = \bar{u}_{кр} / \bar{u}_0 \approx 0,45$ – для асбеста; $Z = \bar{u}_{кр} / \bar{u}_0 \approx 0,64$ – для войлока; $Z = \bar{u}_{кр} / \bar{u}_0 \approx 0,7$ – для кожи [12]. Следовательно, можно записать [12, 14, 15]:

$$Z_0 \approx \frac{\bar{u}_0}{\bar{u}_{кр}}; \quad Z \approx \frac{\bar{u}_{кр}}{\bar{u}_0}. \quad (18)$$

Если при сушке влажных материалов влагосодержание $\bar{u}_{кр}$ и коэффициенты Z и Z_0 неизвестны, то соотношения (16) представляют собой трансцендентные уравнения [16] и для их решения необходимы дополнительные экспериментальные данные [16].

При обработке эксперимента для зависимости [9, 10, 13]

$$N^* \approx \exp(-aN\tau_{II}) \quad (19)$$

в процессах сушки ряда материалов (керамики, асбеста, войлока, картона, кожи, тканей, макарон, овощей) разными способами энергоподвода для коэффициента a была получена общая для всех материалов зависимость [9, 10, 13]

$$a \approx \frac{0,8}{\bar{u}_{кр}}. \quad (20)$$

Комплекс $N\tau_{II}$ представляет комплексную переменную, названную обобщенным временем сушки [1–3]. На рис. 5а дана зависимость коэффициента $a = f(\bar{u}_0)$ для сушки керамики, асбеста, картона и войлока. Обработкой эксперимента получена зависимость

$$a \approx \frac{1}{0,625\bar{u}_0}. \quad (21)$$

Критическое влагосодержание $\bar{u}_{кр}$ из (20)

$$\bar{u}_{кр} \approx \frac{0,8}{a}.$$

На рис. 5б даны зависимости для коэффициентов Z и Z_0 как функция отношения влагосодержаний $\bar{u}_{кр} / \bar{u}_0$ для сушки керамики, асбеста, войлока и картона.

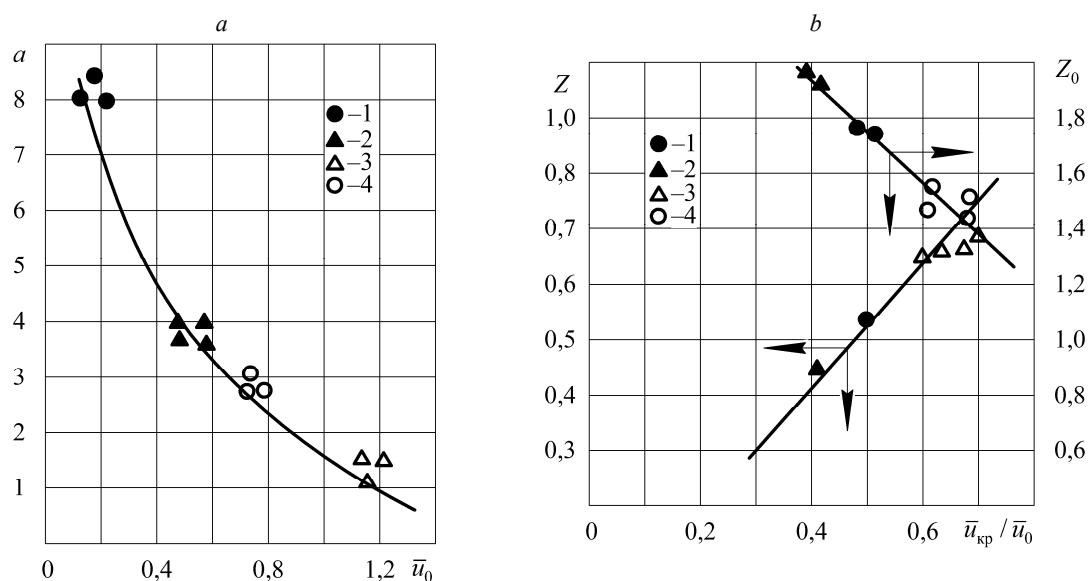


Рис. 5. Зависимость коэффициента a от начального влагосодержания \bar{u}_0 для сушки керамики (1), асбеста (2), войлока (3) и картона (4) (а); зависимость коэффициентов Z и Z_0 от отношения влагосодержаний $\bar{u}_{кр} / \bar{u}_0$ (б) (режимы даны на рис. 1)

Fig. 5. Dependence of the coefficient a on the initial moisture content \bar{u}_0 for drying ceramics (1), asbestos (2), felt (3) and cardboard (4) (a); dependence of the coefficients Z and Z_0 on the ratio of moisture contents $\bar{u}_{кр} / \bar{u}_0$ (b) (the modes are given in Fig. 1)

Зависимости аппроксимируются следующими уравнениями:

$$Z \approx 1,2 \frac{\bar{u}_{кр}}{\bar{u}_0} - 0,07; \quad (22)$$

$$Z_0 \approx \frac{1}{0,83 \frac{\bar{u}_{кр}}{\bar{u}_0} - 0,14}. \quad (23)$$

Решения уравнений (20) и (21) дают критическое влагосодержание:

$$\bar{u}_{кр} \approx \bar{u}_0 (1,2 Z - 0,07); \quad (24)$$

$$\bar{u}_{кр} \approx \frac{\bar{u}_0}{0,83} \left(\frac{1}{Z_0} - 0,14 \right). \quad (25)$$

Таким образом, перекрестная обработка экспериментальных данных по сушке конкретных материалов позволяет определить критическое влагосодержание материалов.

ВЫВОДЫ

1. Установлены плотности потока теплоты для второго периода в процессах сушки керамики, асбеста и войлока.

2. На основе температурного коэффициента сушки даны расчетные уравнения для определения температуры во втором периоде.

3. Предложен метод определения критического влагосодержания материала.

4. Представлена проверка достоверности полученных формул и сравнение расчетных значений с экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 472 с.
2. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. Минск: Бел. наука, 2010. 443 с.
3. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. М.: Энергия, 1973. 288 с.
4. Сажин, Б. С. Научные основы техники сушки / Б. С. Сажин. М.: Наука, 1997. 447 с.
5. Рудобашта, С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. М.: Химия, 1980. 248 с.
6. Ольшанский, А. И. Кинетика теплообмена и экспериментальные методы расчета температуры материала в процессе сушки / А. И. Ольшанский // ИФЖ. 2013. Т. 86, № 3. С. 584–594.
7. Лыков, А. В. Кинетика теплообмена в процессе сушки влажных материалов / А. В. Лыков, П. С. Куц, А. И. Ольшанский // ИФЖ. 1972. Т. 23, № 3. С. 401–406.

8. Журавлева, В. П. Массоперенос при термообработке и сушке капиллярно-пористых строительных материалов / В. П. Журавлева. Минск: Наука и техника, 1972. 189 с.
 9. Ольшанский, А. И. Экспериментальное исследование кинетики сушки тонких плоских влажных материалов методом регулярного режима с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский, А. М. Гусаров // ИФЖ. 2017. Т. 90, № 3. С. 700–713.
 10. Ольшанский, А. И. Экспериментальные исследования тепловлагообмена в процессе конвективной сушки тонких влажных материалов / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 6. С. 564–578. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-564-578>
 11. Филоненко, Г. К. Сушильные установки / Г. К. Филоненко, П. Д. Лебедев. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1952. 263 с.
 12. Ольшанский, А. И. Кинетика влагообмена в процессе конвективной сушки тонких плоских влажных материалов / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // Вес. нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2024. Т. 69, № 3. С. 206–214. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-206-214>
 13. Ольшанский, А. И. Некоторые закономерности кинетики сушки пищевых продуктов / А. И. Ольшанский, П. С. Куц // Изв. вузов. Пищевая технология. 1977. № 5. С. 97–101.
 14. Лыков, А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / А. В. Лыков. М.: Госэнергоиздат, 1956. 464 с.
 15. Кавказов, Ю. Л. Тепло- и массообмен в технологии кожи и обуви / Ю. Л. Кавказов. М.: Легкая индустрия, 1973. 272 с.
 16. Ольшанский, А. И. Исследование процесса сушки пористой керамики методом Докучаева–Смирнова / А. И. Ольшанский // ИФЖ. 2013. Т. 86, № 1. С. 77–85.
- Поступила 07.07.2025
Подписана в печать 10.11.2025
Опубликована онлайн 29.05.2026
- REFERENCES
1. Lykov A. V. (1968) *Drying Theory*. Moscow, Energiya Publ. 472 (in Russian).
 2. Akulich P. V. (2010) *Calculations of Drying and Heat Exchange Installations*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 443 (in Russian).
 3. Krasnikov V. V. (1973) *Conductive Drying*. Moscow, Energiya Publ. 288 (in Russian).
 4. Sazhin B. S. (1997) *Scientific Fundamentals of Drying Techniques*. Moscow, Nauka Publ. 447 (in Russian).
 5. Rudobashta S. P. (1980) *Mass Transfer in Systems with Solid Phase*. Moscow, Khimiya Publ. 248 (in Russian).
 6. Ol'shanskii A. I. (2013) Heat Transfer Kinetics and Experimental Methods for Calculating the Material Temperature in the Drying Process. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 86 (3), 584–594. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0876-1>
 7. Lykov A. V., Kuts P. S., Ol'shanskii A. I. (1972) Kinetics of Heat Transfer in the Process of Drying Wet Materials. *Inzhenerno-Fizichesky Zhurnal = Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 23 (3), 401–406 (in Russian).
 8. Zhuravleva V. P. (1972) *Mass Transfer During Heat Treatment and Drying of Capillary-Porous Construction Materials*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 189 (in Russian).
 9. Ol'shanskii A. I., Gusarov A. M. (2017) Experimental Study of the Kinetics of Drying of Thin Plane Moist Materials by the Regular-Regime Method Using Generalized Complex Variables. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 90 (3), 665–678. <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1614-x>
 10. Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V., Gusarov A. M. (2018) Experimental Studies of Heat and Moisture Exchange in the Process of Convective Drying of Thin Wet Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 564–578 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-564-578>
 11. Filonenko G. K., Lebedev P. D. (1952) *Drying Plants*. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 263 (in Russian).
 12. Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. (2024) Kinetics of Moisture Exchange During Convection Drying of thin Flat Wet Materials. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, 69 (3), 206–214 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-206-214>
 13. Ol'shanskii A. I., Kutz P. S. (1977) Some Patterns of Food Drying Kinetics. *Izvestiya Vuzov. Pishchevaya Tekhnologiya = Izvestiya Vuzov. Food Technology*, (5), 97–101 (in Russian).
 14. Lykov A. V. (1956) *Heat and Mass Transfer in Drying Processes*. Moscow, Gosenergoizdat Publ. 464 (in Russian).
 15. Kavkazov Yu. L. (1973) *Heat and Mass Transfer in Leather and Footwear Technology*. Moscow, Lyogkaya Promyshlennost Publ. 272 (in Russian).
 16. Ol'shanskii A. I. (2013) Investigation of the Processes of Drying of Porous Ceramics by the Dokuchaev–Smirnov Method. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 86 (1), 80–87. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0807-1>
- Received: 07.07.2025
Accepted: 10.11.2025
Published online: 29.05.2026