

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-245-258>

УДК 66.047.7

Температура в периоде падающей скорости сушки тонких плоских капиллярно-пористых влажных материалов

А. И. Ольшанский¹⁾, С. В. Жерносек¹⁾

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

Реферат. Статья посвящена разработке новых способов обработки опытных данных для процессов сушки на основе зависимости безразмерной температуры от обобщенных комплексных переменных, характеризующих наиболее общие закономерности сушки в периоде падающей скорости. В качестве обобщенных комплексных переменных использованы обобщенное время сушки, отношение времени сушки по ее периодам, отношение текущего влагосодержания к критическому. Безразмерный температурный комплекс представляет связь отношения перепада температур в периоде падающей скорости к перепаду температур в периоде постоянной скорости. Рассмотрен метод определения средней температуры из решения нестационарного уравнения теплопроводности для тонких плоских тел на основе критериев Предводителя и Фурье. Для случая нагревания тонкого плоского тела при постоянной температуре среды на основе уравнения баланса теплоты для второго периода сушки дан способ расчета средней температуры с помощью темпа нагрева влажного тела. Представлены методы определения средней температуры для периода падающей скорости сушки на основе комплексных переменных: обобщенного времени сушки и отношения времени сушки по ее периодам. Обработка эксперимента с использованием безразмерного температурного комплекса позволяет определять среднюю температуру материала с учетом влияния на процесс важных характеристик кинетики сушки. Представлена обработка эксперимента на основе температурного коэффициента сушки с использованием экспериментальных температурных кривых. Дана проверка полученных формул на установление точности расчетных значений температуры от экспериментальной температурной кривой. Сопоставление полученных расчетных значений температур с экспериментом дано в таблицах для всех исследуемых материалов.

Ключевые слова: влагосодержание, температура мокрого термометра, коэффициент теплоотдачи, темп нагрева тела, время сушки

Для цитирования: Ольшанский, А. И. Температура в периоде падающей скорости сушки тонких плоских капиллярно-пористых влажных материалов / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 3. С. 245–258. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-245-258>

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

Ol'shanskii Anatolii I.
Vitebsk State
Technological University
72, Moskovsky Ave.,
220035, Vitebsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 112-79-25
tm@vstu.by

Temperature in the Period of Decreasing Drying Rate of Thin Flat Capillary-Porous Wet Materials

A. I. Ol'shanskii¹⁾, S. V. Zhernosek¹⁾

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

Abstract. The article is devoted to the development of new methods for processing experimental data for drying processes based on the dependence of dimensionless temperature on generalized complex variables characterizing the most general patterns of drying in the period of its rate decreasing. The generalized drying time, the ratio of drying time over drying periods, and the ratio of the current moisture content to the critical one are used as generalized complex variables. The dimensionless temperature complex represents the relationship between the ratio of the temperature difference in the period of rate decreasing and the temperature difference in the period of constant rate. A method for determining the average temperature from the solution of an unsteady heat equation for thin flat bodies based on the Predvoditelev and Fourier criteria is considered. For the case of heating a thin flat body at a constant ambient temperature, a method for calculating the average temperature using the heating rate of a wet body is given based on the heat balance equation for the second drying period. The methods for determining the average temperature for the period of decreasing drying rate are presented; they are based on complex variables, viz. generalized drying time and the ratio of drying time by period. Processing the experiment using a dimensionless temperature complex makes it possible to determine the average temperature of the material, taking into account the influence of important characteristics of drying kinetics on the process. The processing of the experiment based on the temperature coefficient of drying using experimental temperature curves is presented. The obtained formulas are checked to establish the accuracy of the calculated temperature values from the experimental temperature curve. A comparison of the obtained calculated temperature values with the experiment is given in the tables for all the materials under study.

Keywords: moisture content, wet bulb temperature, heat transfer coefficient, body heating rate, drying time

For citation: Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V. (2025) Temperature in the Period of Decreasing Drying Rate of Thin Flat Capillary-Porous Wet Materials. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (3), 245–258. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-245-258> (in Russian)

Введение

Температура материала – важнейший показатель процесса сушки, от величины которого зависят не только структурно-механические и физико-технические, но и технологические свойства материалов, определяющие качество готового продукта [1–5].

В соответствии с технологией сушки важное практическое значение имеет контроль температуры в процессе сушки и длительность ее воздействия на влажный материал [4, 5].

Для тонких материалов при незначительных перепадах температур по сечению влажного тела главным лимитирующим фактором является внешний тепловлагоперенос при взаимодействии поверхности испарения материала с внешней средой. Скорость сушки слабо зависит от внутреннего массопереноса [2, 4–6].

Определение температуры в процессе сушки связано с решением дифференциального уравнения теплопроводности, которое связано с больши-

ми математическими трудностями, поскольку процесс сушки нестационарный и коэффициенты тепло- и влагопереноса находятся в сложной форме зависимости от влагосодержания и температуры [7–9]. Поэтому для вычисления температуры используются эмпирические уравнения на основе экспериментальных исследований процессов сушки и обработки экспериментальных данных с минимальным числом постоянных [1–6, 8, 10–12]. Особенно эффективными являются такие методы обработки опытных данных, которые основаны на наиболее общих закономерностях процесса сушки. К таким методам относятся методы А. В. Лыкова, Г. К. Филоненко, В. В. Красникова, Б. С. Сажина [1–5, 10, 13, 14].

В процессах сушки тонких материалов при малых градиентах температуры тонкого тела термическим переносом вещества можно пренебречь. В отсутствие термического переноса интенсифицируется внешний массоперенос и влага переносится к поверхности материала в виде жидкости [2, 4, 8, 9, 14, 15].

Эксперимент. Вывод формул

Рассмотрим новые способы обработки экспериментальных данных, основанные на зависимости безразмерной температуры от комплексных переменных процесса сушки.

На рис. 1а представлены типичные температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ для сушки тонких капиллярно-пористых влажных материалов – войлочной пластины (1), асбестовой пластины (2) и керамической плитки (3). Видно, что по схеме мягкого режима сушки температура в периоде постоянной ее скорости остается постоянной до значения критического влагосодержания $\bar{u}_{кр}$ и равной температуре мокрого термометра $t_{м.т} = t_{п}$ (поверхность влажного тела). При уменьшении влагосодержания $\bar{u} < \bar{u}_{кр}$ процесс сушки протекает в периоде падающей скорости с непрерывным повышением температуры до температуры среды при времени сушки $\tau \rightarrow \infty$ [1–4]. На рис. 1б дана зависимость безразмерной температуры ΔT от времени сушки во втором периоде $\tau_{п}$, отсчитываемом от нуля. Из рис. 1б видно, что температурные кривые образуют экспоненциальные зависимости: для сушки войлока (1), асбеста (2), керамики (3).

Из решения дифференциального уравнения теплопроводности для влажной неограниченной пластины для случая первоначального распределения температуры и влагосодержания при нагреве в среде $t_c = \text{const}$ по закону Ньютона А. В. Лыковым получено уравнение для зависимости безразмерной температуры [7–9]

$$\Delta T = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{м.т}} = f(\exp(\text{Pd} \cdot \text{Fo})),$$

где $\bar{t}$ – среднеинтегральная температура в периоде падающей скорости сушки; Pd, Fo – критерии подобия Предводителя и Фурье,

$$Pd = \frac{\beta R_v^2}{a}; \quad Fo = \frac{a\tau_{II}}{R_v^2},$$

β – скорость изменения температуры на поверхности влажного тела;
 a – коэффициент теплопроводности; R_v – отношение объема тела к поверхности (толщина материала).

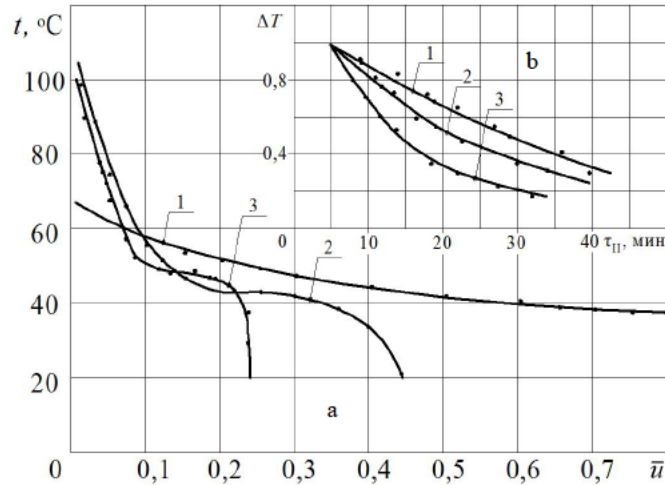


Рис. 1. а – типичные температурные кривые $\bar{T} = f(\bar{u})$ для процессов сушки тонких капиллярно-пористых влажных материалов: 1 – войлочная пластина в режиме сушки $t_c = 90$ °C; $v = 3$ м/с; 2, 3 – пластины листового асбеста и керамической плитки для режима сушки $t_c = 120$ °C; $v = 5$ м/с; б – зависимость безразмерной температуры $\Delta T = f(\tau_{II})$ в процессе сушки войлока (1), асбеста (2), керамики (3) в диапазоне режимных параметров сушки: $t_c = 90; 120$ °C; $v = 3; 5$ м/с

Fig. 1. а – typical temperature curves $\bar{T} = f(\bar{u})$ for drying processes of thin capillary-porous wet materials (a): 1 – felt plate in drying mode $t_c = 90$ °C; $v = 3$ m/s; 2, 3 – plates of sheet asbestos and ceramic tiles for drying mode $t_c = 120$ °C; $v = 5$ m/s; б – dependence of dimensionless temperature during the drying process of felt (1), asbestos (2), ceramics (3) in the range of drying parameters: $t_c = 90; 120$ °C; $v = 3; 5$ m/s

Произведение критериев определяется соотношением

$$Fo \cdot Pd = \frac{a\tau_{II}}{R_v^2} \cdot \frac{\beta R_v^2}{a} = \beta\tau_{II}.$$

Для безразмерной температуры можно записать

$$\Delta T = \frac{t_c - \bar{T}}{t_c - t_{мт}} = \exp(-\beta\tau_{II}). \quad (1)$$

В случае нагревания тонкого плоского влажного тела при температуре $t_c = \text{const}$ и равномерном начальном распределении температуры внут-

ри тела с градиентом температуры в середине пластины, равным нулю, уравнение теплового баланса для периода падающей скорости сушки имеет вид [7, 8, 16]

$$c_{\text{вл}} \rho R_V \frac{d\bar{t}}{d\tau} = \bar{\alpha} (t_c - \bar{t}), \quad (2)$$

где $c_{\text{вл}}$ – удельная теплоемкость влажного тела; ρ – плотность тела; $d\bar{t}/d\tau$ – скорость нагрева тела; $\bar{\alpha}$ – коэффициент теплообмена.

Интегрированием уравнения (2) получим

$$\Delta T = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{\text{м.т}}} = \exp\left(-\frac{\bar{\alpha}}{c_{\text{вл}} \rho R_V} \tau_{\text{II}}\right). \quad (3)$$

Многие исследования [8, 9, 16] показали, что комплекс $\bar{\alpha}/(c_{\text{вл}} \rho R_V)$ – величина постоянная, которая не зависит от режима сушки и определяется родом материала [1, 7, 9, 15].

Комплекс

$$\frac{\bar{\alpha}}{c_{\text{вл}} \rho R_V} = m_i \quad (4)$$

представляет темп нагревания влажного тела [1, 7, 9, 15].

Подставляя (4) в (3), получим уравнение для средней температуры материала в периоде падающей скорости сушки [17]

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{\text{м.т}}) \exp(-m_i \tau_{\text{II}}).$$

На основании (1), (3) и (4) можно записать

$$\beta \tau_{\text{II}} = m_i \tau_{\text{II}}. \quad (5)$$

Обработкой опытных данных по сушке пористой керамики, листового асбеста, шерстяного войлока получено приближенное выражение для темпа нагревания влажного материала [16, 17]

$$m_i = 0,105 \exp(-2\bar{u}_{\text{кр}}).$$

Из экспоненциальных температурных кривых $\Delta T = f(\tau_{\text{II}})$ (рис. 1b) методом наименьших квадратов установлено значение постоянной β для сушки войлока, асбеста, керамики. Значения β для материалов даны в табл. 1.

Среднеинтегральная температура находится из уравнения (1)

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{\text{м.т}}) \exp(-\beta \tau_{\text{II}}). \quad (6)$$

Таблица 1

Значения коэффициентов в расчетных формулах
Values of coefficients in calculation formulas

Материал	m	m_0	β	n	n_0	D_0
Керамическая плита	10,0	4,50	0,09	10	17,0	$1450 - 520\bar{u} / \bar{u}_{кр}$
Листовой асбест	5,5	1,72	0,05	5	12,0	$970 - 410\bar{u} / \bar{u}_{кр}$
Шерстяной войлок	0,45	0,55	0,02	1	2,5	$395 - 285\bar{u} / \bar{u}_{кр}$

На рис. 2а дана зависимость $\Delta T = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$, а на рис. 2б $\Delta T = f(\bar{u}_{кр} - \bar{u})$. Зависимости $\Delta T = f(\bar{u}_{кр} - \bar{u})$ с достаточной точностью аппроксимируются экспоненциальными зависимостями для керамики (1), асбеста (2), войлока (3). Зависимости $\Delta T = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$ представляют линейные зависимости для данных материалов.

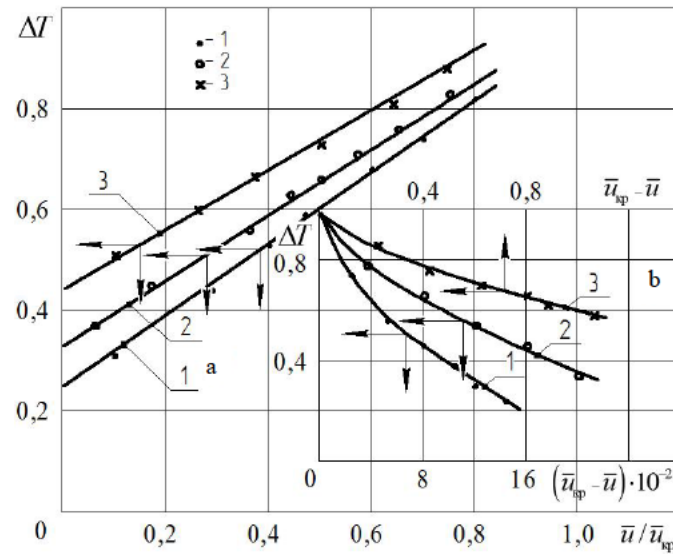


Рис. 2. а – зависимость $\Delta T = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$ для процесса сушки; б – то же $\Delta T = f(\bar{u}_{кр} - \bar{u})$;
1 – керамика; 2 – асбест, 3 – войлок (режимы сушки даны на рис. 1)

Fig. 2. а – dependencies $\Delta T = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$ for the drying process; б – the same $\Delta T = f(\bar{u}_{кр} - \bar{u})$;
1 – ceramics; 2 – asbestos, 3 – felt (drying modes are shown in Fig. 1)

Уравнения температурных кривых имеют вид

$$\Delta T = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{мт}} \exp(-m(\bar{u}_{кр} - \bar{u})). \quad (7)$$

Среднеинтегральная температура определяется уравнением

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{mT}) \exp(-m(\bar{u}_{кр} - \bar{u})), \quad (8)$$

где m – константа, определяемая опытным путем.

В результате обработки экспериментальных данных получена зависимость $\Delta T = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$ для сушки керамики, асбеста и войлока, представляющая собой линейную функцию отношения влагосодержаний

$$\Delta T = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{mT}} = 0,65\bar{u} / \bar{u}_{кр} + 0,35. \quad (9)$$

Анализ уравнения (9) показывает, что при отношении $\bar{u} / \bar{u}_{кр} = 1$, которое является границей перехода первого периода сушки во второй период, температура совпадает с температурой материала $\bar{t} = t_{mT}$. При равновесном влагосодержании ($\bar{u} = u_p$) из безразмерного температурного комплекса следует $\Delta T = 0,35$ и $\bar{t} < t_c$, что не соответствует физическому характеру протекания процесса сушки. Уравнение (9) выполняется только при $\bar{u} / \bar{u}_{кр} > 0,1$, что соответствует конечным значениям влагосодержания материала. Величины постоянной m в уравнении (7) для исследуемых материалов приведены в табл. 1.

Анализ результатов исследований кинетики сушки разных капиллярно-пористых материалов с использованием различных методов обработки экспериментальных данных показал, что при любом режиме сушки сохраняется неизменной величина произведения $N\tau_{II}$ для данного влагосодержания [1–6]. Переменная $N\tau_{II}$, где N – скорость сушки в первом периоде, является устойчивым комплексом переменных и получила название обобщенного времени сушки [1, 3, 4]. Это заключение является следствием, вытекающим из обобщенной кривой кинетики сушки Г. К. Филоненко [13]. На рис. 3 даны температурные кривые $\Delta T = f(N\tau_{II})$ для сушки керамики (1), асбеста (2) и войлока (3). Среднеинтегральная температура вычисляется как функция $N\tau_{II}$

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{mT}) \exp(-m_0 N\tau_{II}). \quad (10)$$

Значения постоянной m_0 даны в табл. 1.

Зависимость для безразмерной температуры ΔT от отношения времени сушки по периодам τ_{II} / τ_I представлена на рис. 4. Температурные кривые выражаются уравнением [17]

$$\Delta T = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{mT}} = \exp\left(-\psi \frac{\tau_{II}}{\tau_I}\right). \quad (11)$$

Среднеинтегральная температура определяется выражением

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{mT}) \exp\left(-\psi \frac{\tau_{II}}{\tau_I}\right). \quad (12)$$

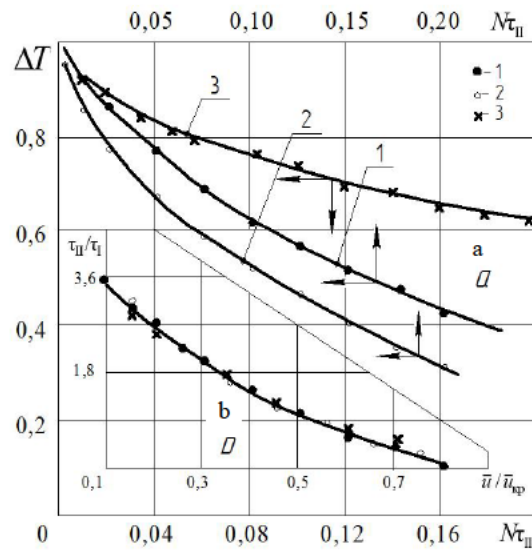


Рис. 3. а – зависимость безразмерной температуры $\Delta T = f(N\tau_{II})$ для процесса сушки керамики (1), асбеста (2) и войлока (3); б – зависимость отношения времени сушки по периодам τ_{II} / τ_I от отношения влагосодержаний $\bar{u} / \bar{u}_{sp}$ (режимы даны на рис. 1)

Fig. 3. a – dependences of dimensionless temperature $\Delta T = f(N\tau_{II})$ (a) for the drying process of ceramics (1), asbestos (2) and felt (3); b – dependence of the drying time ratio by period τ_{II} / τ_I on the moisture content ratio $\bar{u} / \bar{u}_{sp}$ (b) (the modes are shown in Fig. 1)

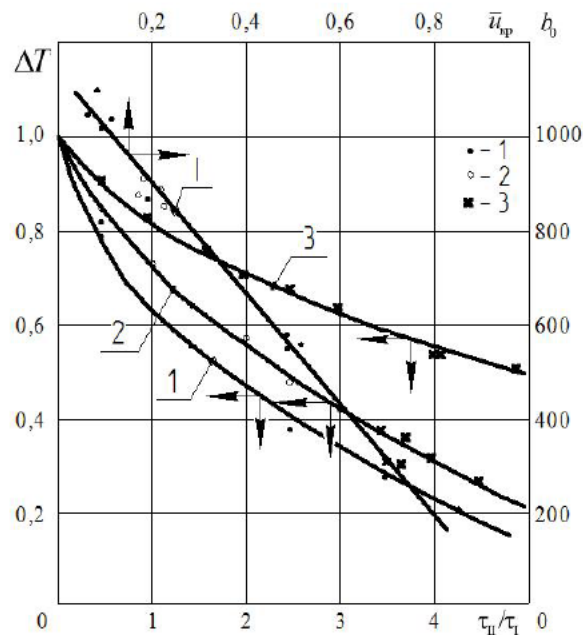


Рис. 4. Зависимости безразмерной температуры ΔT от отношения времени сушки по периодам τ_{II} / τ_I для процессов сушки: керамики (1), асбеста (2) и войлока (3); зависимость коэффициента $b_0 = f(\bar{u}_{sp})$ (прямая I): 1 – керамика; 2 – асбест; 3 – войлок; 4 – картон (режимы сушки даны на рис. 1)

Fig. 4. Dependences of dimensionless temperature ΔT on the ratio of drying time by period τ_{II} / τ_I for the drying process of ceramics (1), asbestos (2) and felt (3); dependence of the coefficient $b_0 = f(\bar{u}_{sp})$ (straight line I): 1 – ceramics; 2 – asbestos; 3 – felt; 4 – cardboard (drying modes are shown in Fig. 1)

В результате обработки опытных данных сушки керамики, асбеста и войлока получено общее для всех материалов значение коэффициента $\psi = 0,4$.

Представлена обработка экспериментальных данных для зависимости отношения τ_{II} / τ_I от отношения влагосодержаний $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$ (рис. 3b). Видно, что для исследуемых материалов все опытные точки с достаточной точностью описываются экспоненциальными кривыми. Уравнение имеет вид [16]

$$\frac{\tau_{II}}{\tau_I} = 3,7 \exp \left(-2,5 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right). \quad (13)$$

В табл. 2 даны значения длительности сушки, вычисленные по формуле (9), для сушки керамической пластины и листового асбеста при $t_c = 120^\circ\text{C}$, $v = 5 \text{ м/с}$.

Таблица 2

Длительность сушки во втором периоде для процесса сушки керамики и асбеста при $t_c = 120^\circ\text{C}$, $v = 5 \text{ м/с}$, $\phi = 5\%$

Drying duration in the second period for the drying process of ceramics and asbestos at a drying mode of $t_c = 120^\circ\text{C}$, $v = 5 \text{ м/с}$, $\phi = 5\%$

Керамическая пластина							
$\bar{u}$	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,02	0,01
$\bar{u} / \bar{u}_{кр}$	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,2	0,1
τ_{II} , мин расч.	3,1	3,8	4,8	6,6	8,4	13,9	20,9
τ_{II} , мин эксп.	3,0	3,7	4,5	6,5	8,0	14,5	21,5
Асбестовая пластина							
$\bar{u}$	0,16	0,14	0,12	0,10	0,08	0,04	0,02
$\bar{u} / \bar{u}_{кр}$	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,2	0,1
τ_{II} , мин расч.	4,0	4,4	7,8	8,5	11,6	18,7	24,2
τ_{II} , мин эксп.	3,0	4,5	6,5	9,0	11,0	18,0	23,5

В расчеты по кинетике сушки А. В. Лыковым введены температурный коэффициент сушки $b = d\bar{t} / d\bar{u}$ и безразмерный температурный коэффициент сушки B , определяемый соотношением [1, 4, 15, 16]

$$B = b \frac{\Delta \bar{u}}{\Delta T} = b \frac{\bar{u}_{кр}}{T_c}. \quad (14)$$

Величина температурного коэффициента сушки $b = d\bar{t} / d\bar{u}$ определяет повышение средней температуры материала в процессе сушки и является важной характеристикой кинетики сушки [1–4]. Величина b является функцией интегрального влагосодержания $b = f(\bar{u})$ и находится графическим дифференцированием температурной кривой $\bar{t} = f(\bar{u})$ (рис. 1).

Зависимости $B = f(\bar{u})$ и $b = f(\bar{u})$ для ряда влажных материалов выражаются эмпирическими формулами [1–4, 16–18]:

$$B = a \exp(-m_1(\bar{u} - \bar{u}_p)); \quad (15)$$

$$b = \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}} = D_0 \exp(-n(\bar{u} - \bar{u}_p)); \quad (16)$$

$$b = \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}} = b_0 \exp(-n_0(\bar{u} - \bar{u}_p)). \quad (17)$$

Постоянные a , m_1 , b_0 , D_0 , n , n_0 определяются экспериментально. Используя эмпирические формулы, можно получить приближенные уравнения температурной кривой и определить среднюю температуру материала $\bar{t}$.

Для средней температуры $\bar{t}$ в периоде падающей скорости сушки можно записать уравнения [3, 16–18]:

$$\frac{\bar{t}}{T_c} = \int \frac{B(\bar{u})}{\bar{u}_{кр}} d\bar{u} + C; \quad (18)$$

$$\bar{t}(\bar{u}) = \int b(\bar{u}) d\bar{u} + C_1; \quad (18)$$

$$\bar{t}(\bar{u}) = t_c - \int b(\bar{u}) d\bar{u} + C_2. \quad (19)$$

Произвольные постоянные C_1 , C_2 вычисляются из условий на границе температур t_c и $t_{мт}$ [4, 8, 9, 16].

Для определения средней температуры $\bar{t}$ воспользуемся формулами (16) и (17). Подставляя в (18) и (19) формулы (16) и (17) и интегрируя в пределах, задаваемых постоянными C_1 и C_2 , получим уравнения температурной кривой [3, 10, 15, 16]:

$$\bar{t} = t_{мт} + \frac{b_0}{n_0} \exp(\bar{u} - \bar{u}_p); \quad (20)$$

$$\bar{t} = t_c - \frac{D_0}{n} [1 - \exp(-n(\bar{u} - \bar{u}_p))]. \quad (21)$$

На рис. 5 даны зависимости температурного коэффициента сушки $\lg b = f(\bar{u})$ для керамики (1), асбеста (2), войлока (3), полученные графическим дифференцированием температурных кривых $\bar{t} = f(\bar{u})$ (рис. 1).

Обработка опытных данных по сушке керамики, асбеста, войлока показала, что значение коэффициента D_0 в уравнении (21) описывается линей-

ной функцией отношения $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$. Графическая зависимость $D_0 = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$ дана на рис. 5. Процесс сушки керамики характеризует прямая I, асбеста – II, войлока – III. Параметры линейных зависимостей $D_0 = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$ приведены в табл. 1.

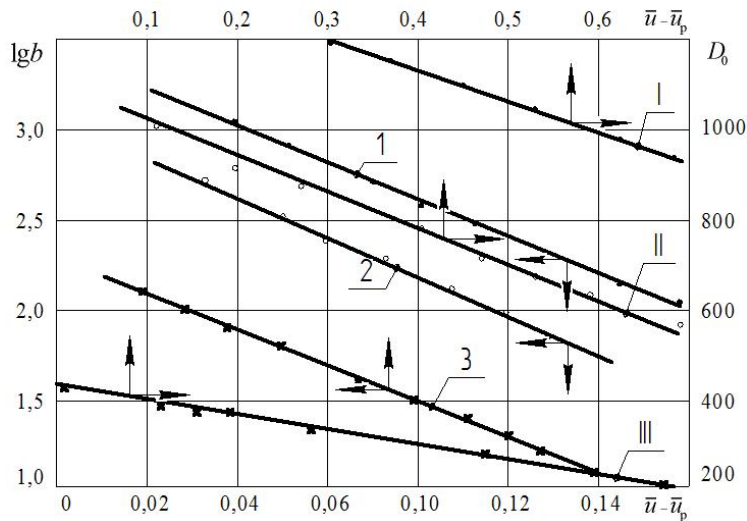


Рис. 5. а – зависимость температурного коэффициента сушки $\lg b$ от влагосодержания $\bar{u} - \bar{u}_p$ для процесса сушки: керамики (1), асбеста (2) и войлока (3);
 б – зависимость коэффициента $D_0 = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$: I – керамика; II – асбест; III – войлок
 (режимы сушки даны на рис. 1)

Fig. 5. а – dependences of the drying temperature coefficient $\lg b$ on moisture content $\bar{u} - \bar{u}_p$ for the drying process of ceramics (1), asbestos (2) and felt (3);
 б – dependence of coefficient $D_0 = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$: I – ceramics; II – asbestos;
 III – felt (drying modes are shown in Fig. 1)

Коэффициент b_0 в уравнении (20) является функцией критического влагосодержания $\bar{u}_{кр}$ и приближенно аппроксимируется одним уравнением для всех рассматриваемых материалов [15–17]

$$b_0 = 10^3 (1,13 - 1,3\bar{u}_{кр}). \quad (22)$$

На рис. 4 дана зависимость $b_0 = f(\bar{u}_{кр})$ (прямая I). Значения постоянных n и n_0 приведены в табл. 1.

В табл. 3 даны проверка полученных формул и сопоставление расчетных значений температуры с экспериментальными. Погрешность между расчетными и экспериментальными значениями находится в пределах точности проведения эксперимента.

Таблица 3

Экспериментальные и расчетные значения среднеинтегральных температур для процессов сушки керамической плитки, листового асбеста и шерстяного войлока
Experimental and calculated values of average integral temperatures for drying processes of ceramic tiles, sheet asbestos and wool felt

Керамическая пористая плитка 120×80×5 мм; $\rho_0 = 1860 \text{ кг/м}^3$. Режим сушки: $t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 3 \text{ м/с}$; $\varphi = 5 \%$; $\bar{u}_0 = 0,2$; $\bar{u}_{кр} = 0,1$; $N = 0,015 \text{ мин}^{-1}$; $t_{мт} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $\tau_I = 6 \text{ мин}$										
$\bar{u}$	$\bar{u} / \bar{u}_{кр}$	$\tau_{II}, \text{ мин}$ экс	$\bar{t}, \text{ }^\circ\text{C}$ экс	$\bar{t}, \text{ }^\circ\text{C}$ (6)	$\bar{t}, \text{ }^\circ\text{C}$ (8)	$\bar{t}, \text{ }^\circ\text{C}$ (10)	$\bar{t}, \text{ }^\circ\text{C}$ (12)	$\bar{t}, \text{ }^\circ\text{C}$ (3)	$\bar{t}, \text{ }^\circ\text{C}$ (20)	$\bar{t}, \text{ }^\circ\text{C}$ (21)
0,08	0,8	3,0	64,0	63,0	63,5	65,0	65,0	64,5	64,0	63,5
0,06	0,6	4,5	72,0	73,5	69,8	72,0	75,0	73,5	72,0	72,8
0,04	0,4	8,0	83,0	81,5	81,7	83,5	82,5	84,4	80,5	81,5
0,02	0,2	14,5	94,0	92,4	93,4	96,4	93,4	95,0	92,4	95,0
0,01	0,1	21,5	103,0	102,0	103,0	103,0	105,0	104,0	105,0	104,0
Листовой асбест 180×100×6 мм; $\rho_0 = 770 \text{ кг/м}^3$. Режим сушки: $t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 5 \text{ м/с}$; $\varphi = 5 \%$; $\bar{u}_0 = 0,46$; $\bar{u}_{кр} = 0,2$; $N = 0,028 \text{ мин}^{-1}$; $t_{мт} = 42 \text{ }^\circ\text{C}$; $\tau_I = 8,5 \text{ мин}$										
0,16	0,80	3,0	52,0	53,5	51,3	51,5	50,5	53,2	52,0	52,5
0,14	0,70	4,5	54,0	56,4	56,2	56,0	54,5	55,0	54,0	56,7
0,12	0,60	6,5	62,0	63,5	61,0	62,5	60,6	63,4	60,0	62,4
0,08	0,40	11,0	72,0	74,4	70,5	74,0	73,0	71,4	70,0	73,6
0,04	0,20	18,0	84,0	84,3	84,5	85,4	86,4	84,3	85,0	81,8
0,02	0,10	23,0	91,0	89,7	89,6	93,6	94,2	92,0	94,0	89,4
0,01	0,05	34,0	103,0	102,0	103,0	103,0	103,0	103,0	104,0	102,0
Шерстяной войлок 180×120×8 мм; $\rho_0 = 180 \text{ кг/м}^3$. Режим сушки: $t_c = 90 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 5 \text{ м/с}$; $\varphi = 6 \%$; $\bar{u}_0 = 1,14$; $\bar{u}_{кр} = 0,75$; $N = 0,047 \text{ мин}^{-1}$; $t_{мт} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$; $\tau_I = 8,0 \text{ мин}$										
0,6	0,80	4,5	42,0	40,0	42,5	41,5	40,5	41,5	43,5	42,0
0,5	0,67	8,0	45,0	43,5	44,5	45,0	44,6	45,0	46,3	44,6
0,4	0,53	11,0	50,0	48,5	50,0	48,6	48,7	48,5	49,2	51,2
0,3	0,40	16,5	53,0	51,6	54,5	52,4	53,0	53,5	51,9	53,4
0,2	0,27	21,5	57,0	56,3	58,6	57,4	57,5	56,4	58,0	58,4
0,1	0,13	38,4	67,0	—	68,0	65,4	66,2	65,8	62,2	69,0

ВЫВОДЫ

1. Предложен метод определения среднеинтегральной температуры на основе результатов решения нестационарного уравнения теплопроводности для тонких плоских влажных тел.
2. Разработан способ определения средней температуры на основе элементов теории регулярного режима.
3. Дан метод определения средней температуры на основе комплексных переменных процесса сушки: обобщенного времени сушки и отношения

времени сушки по периодам. Приведен анализ погрешности расчета значений средней температуры с помощью полученных формул.

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: Белорус. 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, В. Б. Сажин. М.: Наука, 1997. 447 с.
5. Рудобашта, С. П. Теплотехника / С. П. Рудобашта. 2-е изд., доп. М.: Перо, 2015. 672 с.
6. Васильев, В. Н. Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса: учеб. / В. Н. Васильев, В. Е. Куцакова, С. В. Фролов. СПб.: ГИОРД, 2013. 222 с.
7. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. М.: Высш. шк., 1967. 599 с.
8. Лыков, А. В. Теоретические основы строительной теплофизики. Минск: Изд-во АН БССР, 1961. 519 с.
9. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. 535 с.
10. Куц, П. С. Некоторые закономерности тепловлагообмена и приближенные методы расчета кинематики процесса сушки влажных материалов / П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. 1977. Т. 32, № 6. С. 1007–1014.
11. Рабинович, Г. Д. Новый метод расчета конвективной сушки тонких материалов / Г. Д. Рабинович // Инженерно-физический журнал. 1966. Т. 32, № 2. С. 182.
12. Ольшанский, А. И. Регулярный тепловой режим и влияние критериев подобия тепло-массообмена на процесс конвективной сушки пористой керамики / А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. 2016. Т. 89, № 1. С. 37–48.
13. Филоненко, Г. К. Сушильные установки / Г. К. Филоненко, П. Д. Лебедев. М.: Энергоиздат, 1952. 263 с.
14. Лыков, А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А. В. Лыков. М.: Гос. изд-во техн.-теоретич. лит., 1954. 296 с.
15. Ольшанский, А. И. Исследование сушки тонких материалов с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. 2016. Т. 89, № 4. С. 884–894.
16. Ольшанский, А. И. Исследование тепломассообмена в процессах тепловой обработки и сушки теплоизоляционных материалов = Investigation of Heat and Mass Transfer in the Processes of Heat Treatment and Drying of Thermal Insulation Materials / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. № 2. С. 156–168.
17. 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 // Инженер.-физ. журн. 2017. Т. 90, № 3. С. 700–713.

Поступила 14.11.2024 Подписана в печать 16.01.2025 Опубликовано онлайн 30.05.2025

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. (1984) *Scientific Fundamentals of Drying Technique*. Moscow, Khimiya Publ. 320 (in Russian).
5. Rudobashta S. P. (2015) *Thermal Engineering*. Moscow, Pero Publ. 672 (in Russian).
6. Vasiliev V. N., Kutsakova V. E., Frolov S. V. (2013) *Drying Technology. Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. St. Petersburg, GIOR Publ. 222 (in Russian).
7. Lykov A. V. (1967) *Theory of Heat Conductivity*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 599 (in Russian).
8. Lykov A. V. (1961) *Theoretical Foundations of Construction Thermal Physics*. Minsk, Publishing House of the Academy of Sciences of the BSSR. 519 (in Russian).
9. Lykov A. V., Mikhaylov Y. A. (1963) *Theory of Heat and Mass Transfer*. Moscow–Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 535 (in Russian).
10. Kuts P. S., Ol'shanskii A. I. (1977) Some Features of Heat and Moisture Transfer and Approximate Methods of Calculating the Drying Kinetics of Moist Materials. *Journal of Engineering Physics*, 32 (6), 650–656. <https://doi.org/10.1007/BF00862568>.
11. Rabinovich G. D. (1966) Calculation of Radiative-Convective Recuperators. *Journal of Engineering Physics*, 10, 140–143.
12. Ol'shanskii A. I. (2016) Regular Thermal Regime and Influence of Heat and Mass Transfer Similarity Criteria on the Process of Convective Drying of Porous Ceramics. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 89 (1), 38–49. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1351-6>.
13. Filonenko G. K., Lebedev P. D. (1952) *Drying Plants*. Moscow, Energia Publ. 263 (in Russian).
14. Lykov A. V. (1954) *The Phenomena of Transfer in Capillary-Porous Bodies*. Moscow, The State Publishing House of the Technical-Theoretical Literature. 296 (in Russian).
15. Ol'shanskii A. I. (2016) Investigation of the Drying of Thin Materials with the Use of Generalized Complex Variables. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 89 (4), 886–895. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1450-4>.
16. Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V., Gusarov A. M. (2022) Investigation of Heat and Mass Transfer in the Processes of Heat Treatment and Drying of Thermal Insulation Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (2), 156–168. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-156-168> (in Russian).
17. 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>.