

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-516-529>

УДК 66.047.7

Температура в процессе конвективной сушки тонких плоских влажных материалов

А. И. Ольшанский¹⁾, А. А. Котов¹⁾, С. М. Кузьменков¹⁾

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

Реферат. Изложены основные закономерности кинетики сушки тонких плоских материалов в период падающей скорости сушки. Приведены метод расчета среднеинтегральной температуры влажного материала на основе относительного температурного коэффициента сушки, обработка опытных данных на основе относительной скорости сушки в процессах сушки керамики, асбеста, шерстяной ткани. Предложена формула для расчета средней температуры. Приводится решение дифференциального уравнения теплопроводности для влажной пластины в процессе сушки в период падающей скорости при краевых условиях, учитывающих условия сушки, а также расчет коэффициента теплоотдачи. На основе изучения многих источников и обработки результатов экспериментов представлены формулы для вычисления коэффициента теплопроводности влажных материалов. Аналитическое решение задачи подтвердило, что при конвективной сушке в малоинтенсивных процессах второго периода сушки изменение температуры с уменьшением влагосодержания с экспоненциальной зависимости плавно переходит в линейную, что полностью согласуется с экспериментом. Представлено сопоставление значений температуры, полученных по экспериментальной формуле, с результатами аналитических решений. Получено достаточно надежное совпадение экспериментальных и расчетных аналитических значений температуры для периода падающей скорости сушки керамики, асбеста, ткани.

Ключевые слова: влагосодержание, температура, коэффициент сушки, скорость сушки, коэффициент теплообмена, температура мокрого термометра

Для цитирования: Ольшанский, А. И. Температура в процессе конвективной сушки тонких плоских влажных материалов / А. И. Ольшанский, А. А. Котов, С. М. Кузьменков // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 6. С. 516–529. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-516-529>

Temperature During Convective Drying of Thin Flat Wet Materials

A. I. Ol'shanskii¹⁾, A. A. Kotow¹⁾, S. M. Kuzmenkov¹⁾

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

Abstract. The basic laws of the kinetics of drying thin flat materials during the period of drop in the drying speed are outlined. A method for calculating the average integral temperature of wet material on the basis of the relative temperature coefficient of drying is presented. Experimental

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

data are processed based on the relative drying rate in the drying processes of ceramics, asbestos, and woolen fabric. A formula for calculating the average temperature is proposed. The solution of the differential equation of thermal conductivity for a wet plate during the drying process (namely during the period of drop in the drying speed) under boundary conditions taking into account the conditions of drying is given. The calculation of the heat transfer coefficient is given, too. Based on the study of various sources and processing of experimental results, formulas for calculating the thermal conductivity coefficient of wet materials have been presented. The analytical solution of the problem confirmed that during convective drying in low-intensity processes of the second drying period, the temperature change with a decrease in moisture content turns from an exponential dependence smoothly into a linear one, which is completely consistent with the experiment. A comparison of the temperature calculation by the experimental formula with the results of analytical solutions has been presented. A sufficiently reliable coincidence of experimental and calculated analytical values of temperature for the period of drop in speed drying of ceramics, asbestos, and fabric is obtained.

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

For citation: Ol'shanskii A. I., Kotow A. A., Kuzmenkov S. M. (2024) Temperature During Convective Drying of Thin Flat Wet Materials. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (6), 516–529. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-516-529> (in Russian)

Введение

Температура материала является важным параметром сушки, определяющим технологические качества готового продукта. Для определения температуры в периоде падающей скорости сушки необходимо знать зависимость между влагосодержанием влажного тела и временем сушки. Зависимость для определения температуры можно получить решением дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности, для чего необходимо знать достоверные зависимости коэффициентов теплопереноса от влагосодержания и температуры [1–4]. Но в большинстве случаев задача получается достаточно сложной в аналитическом отношении, так как она является существенно нелинейной [1–4]. Поэтому для практики сушки представляют интерес приближенные экспериментальные уравнения, полученные на основе обработки большого числа опытных данных [1–4]. Однако в связи с широким применением компьютерной техники и развитием численных методов решения дифференциальных уравнений становится возможным использовать результаты этих решений для расчета кинетики сушки [2, 3]. В малоинтенсивных процессах термической обработки влажных материалов, когда температура не претерпевает значительных изменений за малые промежутки времени, а коэффициенты теплопереноса являются функцией только влагосодержания, возникает возможность использовать результаты этих решений для расчета кинетики сушки конкретных влажных материалов [5–8].

Аналитические решения приобретают важное значение тогда, когда они согласуются с закономерностями, установленными экспериментальным путем. С этой целью необходимо проводить обработку опытных данных с согласованием полученных результатов с результатами аналитических решений.

Кинетика сушки

Конвективная сушка тонких материалов проводилась нагретым воздухом с такими постоянными параметрами, как: температура t_c , °С, скорость движения v , м/с, относительная влажность ϕ , %. Сушимые тонкие материалы имеют большую удельную поверхность, так что перепады влагосодержания внутри материала и градиенты температуры малы. Режимы сушки тонких плоских тел в интервале температур воздуха $t_c = 90\text{--}120$ °С и скорости $v = 3\text{--}5$ м/с относятся к достаточно «мягким» режимам, без резких скачков температуры.

На рис. 1 представлены температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ в процессе сушки керамической пластины и листового асбеста при режиме сушки: $t_c = 120$ °С, $v = 5$ м/с, $\phi = 5$ %. На рис. 2 даны температурные кривые $\bar{t} = f(\tau)$ в процессе сушки шерстяной ткани для режимов сушки: $t_c = 65$ °С, $v = 1$ м/с, $\phi = 10$ % (1) и $t_c = 90$ °С, $v = 5$ м/с, $\phi = 6$ % (2).

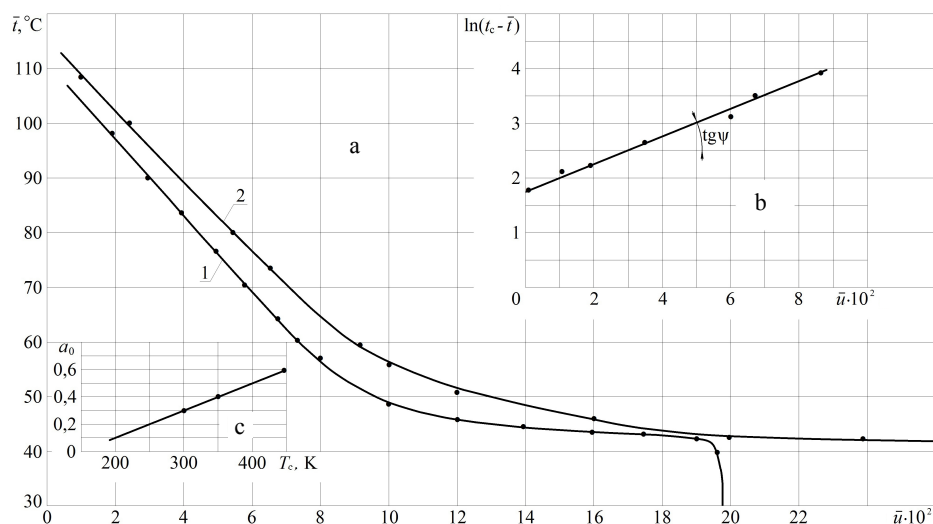


Рис. 1. Температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ (а) в процессе сушки керамической пластины (1) и листового асбеста (2) (режим сушки: $t_c = 120$ °С, $v = 5$ м/с, $\phi = 5$ %); зависимости $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\bar{u})$ (б), коэффициента $a_0 = f(T_c)$ (с) в процессе сушки керамической плитки (режим сушки: $t_c = 90\text{--}120$ °С; $v = 3\text{--}5$ м/с)

Fig. 1. Temperature curves $\bar{t} = f(\bar{u})$ (a) during the drying of ceramic plate (1) and asbestos sheet (2) (drying mode: $t_c = 120$ °С, $v = 5$ m/s, $\phi = 5$ %) and the dependences $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\bar{u})$ (b), coefficient $a_0 = f(T_c)$ (c) in the process of drying ceramic tiles (drying modes: $t_c = 90\text{--}120$ °С; $v = 3\text{--}5$ m/s)

Характер протекания процесса сушки керамики, асбеста принципиально отличается от характера сушки тканей, материалов, сушка которых протекает только в периоде ее падающей скорости и без периода постоянной температуры [1, 3, 9].

В процессе сушки керамики и асбеста влагосодержание $\bar{u}$ вначале уменьшается линейно до гигроскопического $\bar{u}_{кр}$. При влагосодержании $\bar{u} < \bar{u}_{кр}$ начинается период падающей скорости сушки. Принято назы-

вать период постоянной скорости сушки первым, а период падающей скорости – вторым [2, 3]. Отличительной особенностью сушки таких капиллярно-пористых материалов является наличие и периода постоянной температуры на уровне температуры мокрого термометра t_m [1–4] (рис. 1). Кривая сушки $\bar{u} = f(\tau)$ во втором периоде представляет экспоненциальную зависимость [1, 2]. При сушке тканей (рис. 2) температура увеличивается с начала сушки по экспоненциальному закону и с уменьшением влагосодержания $\bar{u}$ плавно переходит в линейную зависимость. Такой же характер имеют температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ при сушке керамики и асбеста (рис. 1).

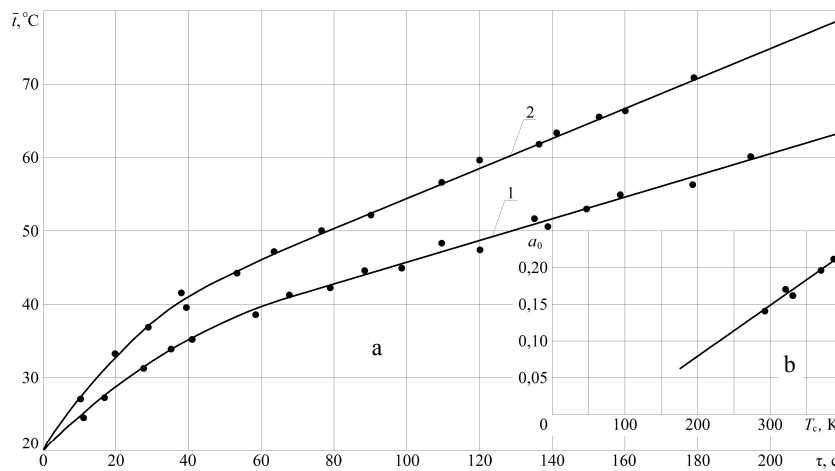


Рис. 2. Температурные кривые $\bar{t} = f(\tau)$ (а) при сушке шерстяной ткани для двух режимов сушки: $t_c = 65^\circ\text{C}$, $v = 1$ м/с, $\varphi = 10\%$ (кривая 1), $t_c = 90^\circ\text{C}$, $v = 5$ м/с, $\varphi = 6\%$ (кривая 2); зависимость коэффициента $a_0 = f(T_c)$ (б) для двух режимов сушки

Fig. 2. Temperature curves $\bar{t} = f(\tau)$ (a) during drying of woolen fabric for two drying modes: $t_c = 65^\circ\text{C}$, $v = 1$ m/s, $\varphi = 10\%$ (curve 1), $t_c = 90^\circ\text{C}$, $v = 5$ m/s, $\varphi = 6\%$ (curve 2) and the dependence of the coefficient $a_0 = f(T_c)$ (b) for two drying modes

Рассмотрим основные положения кинетики сушки, необходимые для расчета температуры в период ее падающей скорости. Относительная скорость сушки [1–5]

$$N^* = \frac{1}{N} \cdot \frac{d\bar{u}}{d\tau}, \quad (1)$$

где N – скорость сушки в первом периоде [1–4],

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = K(\bar{u} - u_p), \quad (2)$$

K – коэффициент сушки; u_p – равновесное влагосодержание материала.

Величина N^* не зависит от режима сушки и является только функцией влагосодержания [1–3].

При сушке тканей относительная скорость сушки [1, 9]

$$N^* = \frac{1}{\left(\frac{d\bar{u}}{d\tau}\right)_{\text{макс}}} \cdot \frac{d\bar{u}}{d\tau} = \frac{1}{N_{\text{макс}}} \cdot \frac{d\bar{u}}{d\tau}, \quad (3)$$

где $N_{\text{макс}}$ – максимальная скорость сушки.

Обработкой опытных данных сушки большого количества разных влажных материалов различными методами получена общая зависимость для ее относительной скорости [5]

$$\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{\text{кр}}} = N^{*0,57}, \quad (4)$$

где $\bar{\alpha}_{\text{кр}}$, $\bar{\alpha}$ – коэффициенты теплоотдачи в первом и втором периодах сушки.

П. Д. Лебедевым [1–4] предложено изменение коэффициента теплоотдачи во втором периоде учитывать соотношением

$$\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{\text{кр}}} = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}}\right)^n, \quad (5)$$

где n – постоянная, определяемая экспериментально.

При сушке тканей

$$\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{\text{макс}}} = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_0}\right)^n,$$

где $\bar{\alpha}_{\text{макс}}$ – максимальное значение коэффициента теплоотдачи в начальный момент сушки; $\bar{u}_0$ – начальное влагосодержание материала.

Для керамики, асбеста, войлока постоянная $n = 0,5$, для сукна и тканей $n = 0,42$ [1, 5, 9]. На основании (4) и (5) для относительной скорости сушки можно записать

$$N^* = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}}\right)^{\frac{n}{0,57}}.$$

Для керамики и асбеста имеем

$$N^* = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}}\right)^{0,88}, \quad (6)$$

для тканей

$$N^* = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}}\right)^{0,74}. \quad (7)$$

В. В. Красников [2] на основе анализа обобщенных кривых и скорости сушки получил уравнение для ее скорости

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = N \cdot N^*. \quad (8)$$

Из него следует, что скорость сушки в период падающей скорости можно определить по величинам N и N^* для заданного влагосодержания $\bar{u}$ [1–6].

Из уравнений (2) и (8) коэффициент сушки K равен

$$K = \frac{N \cdot N^*}{\bar{u} - u_p} = \frac{N \cdot (\bar{u}/\bar{u}_{кр})^{0,88}}{\bar{u} - u_p}. \quad (9)$$

Для сушки тканей

$$K = \frac{N_{\text{макс}} \cdot (\bar{u}/\bar{u}_0)^{0,74}}{\bar{u} - u_p}. \quad (10)$$

Следовательно, коэффициент сушки K во втором периоде величина переменная.

Для расчета средней температуры материала во втором периоде сушки А. В. Лыковым [1, 5, 7, 8] был введен в кинетику сушки относительный температурный коэффициент сушки:

$$B = \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}} \frac{\Delta\bar{u}}{\Delta t}; \quad \frac{d\bar{t}}{\Delta t} = B \frac{d\bar{u}}{\Delta\bar{u}}, \quad (11)$$

где $\Delta\bar{u}$ и Δt – фиксированные значения влагосодержания и температуры; $d\bar{t}/d\bar{u} = b$ – температурный коэффициент сушки, определяемый графическим дифференцированием температурной кривой $\bar{t} = f(\bar{u})$.

Относительный температурный коэффициент сушки B является наиболее общей характеристикой процесса, определяющей закономерности изменения температуры во втором периоде [1–3].

Для большого ряда капиллярно-пористых материалов зависимость $B = f(\bar{u})$ выражается эмпирической формулой [1, 2, 5, 7, 8]

$$B = a_0 \exp(-m(\bar{u} - u_p)). \quad (12)$$

Постоянные a_0 и m определяются экспериментально.

Для случая конвективной сушки за фиксированные значения $\Delta\bar{u}$ и Δt удобно принять: $\Delta\bar{u} = \bar{u}_{кр}$, $\Delta t = T_c$, где T_c – абсолютная температура среды [1, 2, 5, 7, 8]. Подставляя в (11) уравнение (12) и интегрируя, получим уравнение температурной кривой

$$\bar{t} = t_c - \frac{a_0 T_c}{m \bar{u}_{кр}} \left(1 - \exp(-m(\bar{u} - u_p)) \right). \quad (13)$$

Для материалов, сушка которых протекает в период ее падающей скорости без периода постоянной температуры с непрерывным повышением температуры, постоянная m меняет свой знак на противоположный и уравнение принимает вид [7–9]

$$\bar{t} = t_c - \frac{a_0 T_c}{m \bar{u}_0} \left(\exp(m(\bar{u} - u_p)) - 1 \right). \quad (14)$$

Коэффициент a_0 является линейной функцией абсолютной температуры. Постоянная m находится построением графической зависимости $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\bar{u})$. Если отложить по оси ординат величину $\ln(t_c - \bar{t})$, а по оси абсцисс – влагосодержание $\bar{u}$, то получим прямую, тангенс угла наклона которой к оси $\bar{u}$ равен величине постоянной m [1, 8]:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\ln(t_c - \bar{t}_1) - \ln(t_c - \bar{t}_2)}{\bar{u}_1 - \bar{u}_2} = m.$$

На рис. 1б изображена такая зависимость для процесса сушки керамической пластины, а на рис. 1с и 2б даны линейные зависимости для коэффициента a_0 в процессах сушки керамики и тканей. Значения m и a_0 для некоторых материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения постоянных m и a_0 при влагосодержаниях $\bar{u}_0$, $\bar{u}_{кр}$ и режимов сушки керамики, асбеста, войлока, картона и шерстяной ткани

The values of constants m and a_0 at moisture contents of $\bar{u}_0$, $\bar{u}_{кр}$ and drying modes of ceramics, asbestos, felt, cardboard and woolen fabric

Материал	$\bar{u}_0$	$\bar{u}_{кр}$	Режим сушки			m	a_0
			$t_c, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м/с}$	$\varphi, \%$		
Керамическая плитка, $\delta = 5 \text{ мм}$	0,2–0,24	0,1–0,12	90–120	3–5	4	35	$3,9 \cdot 10^{-3} \cdot T_c - 1$
Листовой асбест, $\delta = 6 \text{ мм}$	0,46–0,48	0,2–0,22	90–120	3–5	5	22	$6,4 \cdot 10^{-3} \cdot T_c - 1,8$
Шерстяной войлок, $\delta = 8 \text{ мм}$	1,14–1,16	0,71–0,75	90–150	3–5	5	12	$2,85 \cdot 10^{-3} \cdot T_c - 0,7$
Технический картон, $\delta = 4,5 \text{ мм}$	0,75–0,78	0,5–0,55	90–110	3–5	6	–1,8	$0,415 \cdot 10^{-3} \cdot T_c - 0,1$
Шерстяная ткань, $\delta = 0,6–0,8 \text{ мм}$	1,12–1,14	–	65–90	2–5	6	–0,2	$1,1 \cdot 10^{-3} \cdot T_c - 0,17$

Из уравнений (13) и (14) следует, что средняя температура материала от влагосодержания изменяется по закону экспоненты. Если разложить в ряд $\exp(-m(\bar{u} - u_p))$ и ограничиться первыми членами ряда, то с уменьшением влагосодержания экспоненциальная зависимость переходит в линей-

ную [1]. При этом температурные коэффициенты сушки $b = d\bar{t}/d\bar{u} = \text{const}$ и $B = b \cdot \bar{u}_{\text{кр}}/T_c = \text{const}$, а коэффициент $a_0 = B$ [1, 2]. Тогда линейное уравнение температурной кривой будет иметь вид [10, 11]

$$\bar{t} = t_c - \frac{BT_c}{\bar{u}_{\text{кр}}}(\bar{u} - u_p). \quad (15)$$

Обозначим комплекс $BT_c/\bar{u}_{\text{кр}}$ через b_0 и запишем [11]

$$\bar{t} = t_c - b_0(\bar{u} - u_p). \quad (16)$$

А. В. Лыков на основе изучения многих процессов сушки различных капиллярно-пористых материалов считает, что зависимость между средней температурой $\bar{t}$ и влагосодержанием $\bar{u}$ может быть линейной [1, 10, 11, 12] и выражаться формулой (16). Например, для такого типичного капиллярно-пористого тела, как пористая керамика, при сушке в режимах при: $t_c = 60^\circ\text{C}$, $\varphi = 10\%$ и $t_c = 80^\circ\text{C}$, $\varphi = 6\%$ и скорости воздуха $v \approx 0,5\text{--}0,8$ м/с, В. П. Журавлева показала, что в периоде падающей скорости сушки зависимости между средней температурой и влагосодержанием являются линейными [1, 13], а температурный коэффициент сушки $b = d\bar{t}/d\bar{u} = \text{const}$.

Из рис. 1 и 2 при сушке керамической пластины, листового асбеста и ткани видно, что зависимости $\bar{t} = f(\bar{u})$ и $\bar{t} = f(\tau)$ с уменьшением $\bar{u}$ становятся линейными.

Сушка тканей имеет свои особенности. В отличие от большинства других тонких материалов сушка происходит сразу в период падающей скорости от начального влагосодержания $\bar{u}_0$ и без периода постоянной температуры [8]. Ткани на сушку подаются после механического отжима с влагосодержанием $\bar{u}_0 \approx 1,1\text{--}1,3$. При сушке тканей, как очень тонких материалов (толщина $\delta \approx 0,4\text{--}1,6$ мм), расход теплоты на нагревание влажного тела намного меньше расхода теплоты на испарение из него влаги [1, 9].

Для использования формулы (15) при расчете средней температуры необходимо знать относительный температурный коэффициент сушки B . В области линейной зависимости $\bar{t} = f(\bar{u})$ коэффициент $B = \text{const}$. Коэффициент B в процессе сушки керамической пластины ($t_c = 120^\circ\text{C}$, $v = 5$ м/с) для области влагосодержаний $\bar{u} \approx 0,06\text{--}0,025$ по формуле (12) дает значение $B \approx 0,21$, по экспериментальным данным [7, 8] $B = 0,214$. Параметр $b_0^{\text{экс}} \approx BT_c/\bar{u}_{\text{кр}} \approx 840$ К. Точность определения параметра $b_0^{\text{экс}}$ зависит от погрешности графического дифференцирования температурной кривой $\bar{t} = f(\bar{u})$.

По данным В. П. Журавлевой [13], при сушке керамической плитки толщиной $\delta \approx 6$ мм получены следующие значения для B при скорости воздуха $v = 4$ м/с:

- 1) $t_c = 100^\circ\text{C}$, $B \approx 0,08$;
- 2) $t_c = 150^\circ\text{C}$, $B \approx 0,11$;
- 3) $t_c = 200^\circ\text{C}$, $B \approx 0,23$.

Полученные В. П. Журавлевой значения коэффициента B согласуются со значениями опытных данных в работах [14–16].

А. В. Лыковым из решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности для неограниченной пластины получено уравнение для параметра b_0 [11, 12].

Уравнение теплопроводности:

при $\tau = 0$; $t = t_m$

$$\frac{\partial \bar{t}}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \bar{t}}{\partial x^2}; \quad (17)$$

при $x = \pm R$

$$\frac{\partial \bar{t}}{\partial x} - \frac{\bar{\alpha}}{\lambda_{вл.}} (t_c - \bar{t}) - \frac{\rho r R}{\lambda_{вл.}} \cdot \frac{d\bar{u}}{d\tau} = 0, \quad (18)$$

где a – коэффициент температуропроводности; $\bar{\alpha}$ – то же теплоотдачи; $\lambda_{вл.}$ – то же теплопроводности влажного тела; R – половина толщины пластины; ρ – плотность материала; r – теплота парообразования.

Для тонких материалов скорость сушки – экспоненциальная функция времени

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} = K(\bar{u} - u_p). \quad (19)$$

Интегрирование (19) для периода падающей скорости сушки

$$\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} = \exp(-K\tau_{II}), \quad (20)$$

где $\bar{u}_{кр}$ – критическое влагосодержание при переходе первого периода сушки во второй; τ_{II} – время сушки во втором периоде, отсчитываемое от нуля.

Решением дифференциального уравнения с заданными краевыми условиями, учитывающим скорость сушки в периоде падающей скорости, методом разделения переменных для средней температуры получено уравнение [11]

$$\bar{t} = t_c - \frac{rRK\rho}{\bar{\alpha} - Kc_{вл}\rho R} (\bar{u} - u_p). \quad (21)$$

Обозначим через b_0 часть уравнения (21)

$$b_0 = \frac{rRK\rho}{\bar{\alpha} - Kc_{вл}\rho R}, \quad (22)$$

где $c_{вл}$ – удельная теплоемкость влажного тела.

Выражение для параметра b_0 можно упростить, если знаменатель в (22) умножим и разделим на $c_{\text{вл}}\rho R$. В результате получим

$$b_0 = \frac{rK}{c_{\text{вл}}(Z - K)}. \quad (23)$$

Вычислим параметр Z [11]

$$Z = \frac{\bar{\alpha}}{c_{\text{вл}}\rho R}. \quad (24)$$

Комплекс Z определяет интенсивность теплообмена при взаимодействии поверхности пластины с окружающей средой.

Уравнение температурной кривой запишем в виде

$$\bar{t} = t_c - \frac{rK}{c_{\text{вл}}(Z - K)}(\bar{u} - u_p). \quad (25)$$

Уравнение (25) с учетом выражения (22) приводит к виду (16). Средняя температура $\bar{t}$ во втором периоде с уменьшением влагосодержания представляет линейную зависимость $\bar{t} = f(\bar{u})$. Решение справедливо в случае, если параметр $Z > K$ [11].

Коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$ определяется по формуле для теплообменного критерия Нуссельта [1, 3, 7]

$$\text{Nu} = C \cdot \text{Re}^{0,5} \cdot \left(\frac{T_c}{T_m} \right)^2 \cdot \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right)^n, \quad (26)$$

где Re – число Рейнольдса; T_c , T_m – абсолютные температуры среды и мокрого термометра; коэффициент C принимает значения: $C = 0,75$ – для керамики, $C = 0,70$ – для асбеста, $C = 0,89$ – для тканей; коэффициент $n = 0,5$ – для керамики и асбеста, $n = 0,42$ – для тканей.

Коэффициент теплоотдачи определяется выражением

$$\bar{\alpha} \approx \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{\text{воз}}}{l}, \quad (27)$$

где $\lambda_{\text{воз}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха по таблицам [2]; l – длина образца материала по направлению набегания потока воздуха.

При сушке влажных материалов влагосодержание уменьшается, а температура увеличивается, поэтому все теплофизические коэффициенты изменяются. Наибольшее изменение претерпевает коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{вл}}$. Коэффициент температуропроводности a изменяется мало, так как со снижением $\lambda_{\text{вл}}$ одновременно уменьшается произведение $c_{\text{вл}} \cdot \rho$, приблизительно с такой же скоростью [10, 11]. Средняя удельная теплоемкость $c_{\text{вл}}$ зависит от влагосодержания материала и незначительно от температуры

$$c_{\text{вл.}} \approx c_0 + c_{\text{в}} \cdot \bar{u},$$

где c_0 – удельная теплоемкость сухого тела; $c_{\text{в}}$ – теплоемкость воды.

Коэффициенты теплопроводности сухих материалов λ_0 почти не зависят от температуры в области от 30 до 90 °С [1–3].

Коэффициенты теплоотдачи $\bar{\alpha}$ в периоде падающей скорости сушки, определяемые по формуле (26), полученной из теории подобия на основе эксперимента, отражают приближенные значения $\bar{\alpha}$. Поэтому и очень важный параметр Z также определяется приближенно.

Обработкой опытных данных по коэффициенту $\lambda_{\text{вл}}$ для керамики и асбеста по формуле В. И. Дубницкова, на основе изучения источников [1, 10, 13, 17–19] получена формула

$$\lambda_{\text{вл.}} = \lambda_0 + A_0 \bar{t} \cdot \bar{u} \exp(-B_0 \bar{u}), \quad (28)$$

где коэффициенты A_0 , B_0 определяются опытным путем; для керамики: $A_0 = 0,075$, $B_0 = 2$, $\lambda_0 = 0,8$ Вт/м·°С; для асбеста: $A_0 = 0,03$, $B_0 = 2$, $\lambda_0 = 0,12$ Вт/м·°С.

Коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{вл}}$ для шерстяных тканей и шерстяного строительного войлока практически не зависит от температуры до $t \approx 90$ °С. Зависимость $\lambda_{\text{вл}}$ для шерстяных тканей и войлока от влагосодержания хорошо изучена [17, 20] и приближенно выражается соотношением

$$\lambda_{\text{вл.}} \approx \lambda_0 + \left(\frac{d\lambda}{dW} \right) W,$$

где W – влагосодержание, %.

Отношение $d\lambda/dW$ характеризует прирост коэффициента теплопроводности на каждый 1 % прироста влажности. В сушильной практике принята связь $\bar{u} = 0,01W$. Для шерстяных тканей и войлока ($\rho = 150\text{--}350$ кг/м³) величина $d\lambda/dW$ приближенно составляет 0,0029–0,0046 и с погрешностью не более чем в 5 % определяется по формуле [20]

$$\lambda_{\text{вл.}} = \lambda_0 + 0,004W. \quad (29)$$

Значения средних температур для процессов сушки керамической плитки, листового асбеста и шерстяной ткани, вычисленных по экспериментальным формулам (13), (15) и по аналитической (25), даны в табл. 2. По формуле (15) расчет температуры был проведен при $\bar{u} < \bar{u}_{\text{кр}}$, принимая линейную зависимость средней температуры $\bar{t}$ от влагосодержания $\bar{u}$. Анализ полученных расчетных значений температур по всем формулам дает погрешность 5–8 %. Следовательно, температурную кривую $\bar{t} = f(\bar{u})$ во втором периоде нет необходимости делить на две зоны. В общем случае для капиллярно-пористых материалов температурная кривая представляет пологую экспоненту, плавно переходящую при уменьшении влагосодержания в линейную зависимость.

Таблица 2

Значения средних температур, вычисленных по формулам (13), (15), (25), и комплекса в уравнении (25) для сушки керамики, листового асбеста и шерстяной ткани

The values of average temperatures calculated by the formulas (13), (15), (25) and the complex in equation (25) for drying ceramics, asbestos sheets and woolen fabric

Керамическая плитка: $120 \times 80 \times 5$ мм; $\rho = 1840$ кг/м ³ ; $\lambda_0 = 0,8$ Вт/(м·°C); $c_0 = 860$ Дж/кг·°C; $\bar{u}_0 = 0,2$; $\bar{u}_{кр} = 0,1$; $u_p = 0$. Режим сушки: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %; $t_m = 50$ °C; $N = 0,0185$ мин ⁻¹										
$\bar{u}$	$\bar{\alpha}$, Вт/(м ² ·°C) (26)	$\lambda_{вд}$, Вт/(м·°C) (28)	N^* (6)	Z , мин ⁻¹ (24)	K , мин ⁻¹ (9)	b_0 , °C (23)	$\bar{t}$, °C экс	$\bar{t}$, °C (13)	$\bar{t}$, °C (15)	$\bar{t}$, °C (25)
0,08	63,5	0,79	0,82	0,69	0,184	870	60	62	55	53
0,07	55,4	0,75	0,73	0,62	0,185	860	65	65	62	60
0,06	46,4	0,72	0,64	0,67	0,192	870	72	69	70	69
0,05	41,6	0,68	0,54	0,65	0,200	870	80	77	78	77
0,04	38,4	0,64	0,45	0,68	0,210	880	85	82	87	85
0,03	30,8	0,60	0,36	0,67	0,215	880	98	94	96	95
0,02	23,6	0,57	0,24	0,68	0,220	890	100	100	103	102
Листовой асбест: $120 \times 80 \times 6$ мм; $\rho = 770$ кг/м ³ ; $\lambda_0 = 0,123$ Вт/м·°C; $c_0 = 825$ Дж/кг·°C; $\bar{u}_0 = 0,46$; $\bar{u}_{кр} = 0,20$; $u_p = 0$. Режим сушки: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %; $t_m = 42$ °C; $N = 0,028$ мин ⁻¹										
0,16	36,2	0,328	0,82	0,61	0,140	450	52	54	54	54
0,14	33,3	0,289	0,73	0,60	0,140	470	57	57	57	55
0,10	31,6	0,252	0,54	0,71	0,150	510	65	62	65	64
0,08	28,4	0,212	0,45	0,69	0,155	550	72	70	78	72
0,04	20,8	0,174	0,24	0,78	0,165	600	86	84	–	89
0,02	18,6	0,135	0,14	0,80	0,180	680	100	99	–	104
Шерстяная ткань: $\delta = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м; $\rho = 200$ кг/м ³ ; $\lambda_0 = 0,046$ Вт/м·°C; $c_0 = 1300$ Дж/кг·°C; $\bar{u}_0 = 1,12$; $u_p = 0,002$. Режим сушки: $t_c = 90$ °C; $v = 5$ м/с; $\varphi = 6$ %; $N_{\max} = 0,016$ с ⁻¹										
$\bar{u}$	$\bar{\alpha}$, Вт/(м ² ·°C) (26)	$\lambda_{вд}$, Вт/(м·°C) (28)	N^* (7)	Z , с ⁻¹ (24)	K , с ⁻¹ (9)	b_0 , °C (23)	$\bar{t}$, °C экс	$\bar{t}$, °C (14)	$\bar{t}$, °C (16)	$\bar{t}$, °C (25)
0,7	32,7	0,328	0,72	0,120	0,016	90	34	34	32	30
0,6	30,8	0,289	0,65	0,131	0,017	94	38	37	36	35
0,5	26,4	0,252	0,57	0,127	0,018	96	45	44	42	42
0,4	25,4	0,212	0,50	0,168	0,020	98	48	52	49	51
0,3	23,5	0,175	0,39	0,220	0,021	99	56	61	58	59
0,2	22,4	0,142	0,29	0,260	0,022	110	67	71	68	67

ВЫВОДЫ

1. Рассмотренные закономерности изменения температуры в периоде падающей скорости сушки показали, что температурная кривая в этом периоде представляет сложную экспоненциальную зависимость, переходя-

щую при уменьшении влагосодержания в пологую экспоненту, близкую к линейной. Аналитическое решение задачи подтверждает закономерности изменения температуры, установленные опытным путем.

2. Аналитические решения совместно с экспериментальными методами имеют актуальное значение, когда они подтверждают опытные данные. Такие совместные исследования сближают теорию с практикой сушки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 472 с.
2. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. М.: Энергия, 1973. 288 с.
3. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. Минск: Бел. наука, 2010. 443 с.
4. Рудобашта, С. П. Массотеплоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. М.: Химия, 1980. 248 с.
5. Лыков, А. В. Кинетика теплообмена в процессе сушки влажных материалов / А. В. Лыков, П. С. Куц, А. И. Олышанский // Инженерно-физический журнал. 1972. Т. 23, № 3. С. 401–406.
6. Васильев, В. Н. Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса / В. Н. Васильев, В. Е. Куцакова, С. В. Фролов. СПб.: ГИОРД, 2013. 224 с.
7. Олышанский, А. И. Кинетика теплообмена и экспериментальные методы расчета температуры материала в процессе сушки / А. И. Олышанский // Инженерно-физический журнал. 2013. Т. 86, № 3. С. 584–594.
8. Куц, П. С. К вопросу приближенной методики расчета кинетики конвективной сушки плоских материалов / П. С. Куц, А. И. Олышанский // Инженерно-физический журнал. 1975. Т. 28, № 4. С. 594–598.
9. Олышанский, А. И. Исследование кинетики тепловлагообмена при термической обработке и сушке тонких влажных теплоизоляционных материалов / А. И. Олышанский, А. Н. Голубев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. Объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 1. С. 66–79. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-66-79>.
10. Лыков, А. В. Теоретические основы строительной теплофизики / А. В. Лыков. Минск: Изд. АН БССР, 1961. 519 с.
11. Лыков, А. В. Теория сушки капиллярно-пористых коллоидных материалов пищевой промышленности / А. В. Лыков, Л. Я. Ауэрман. М.: Пищепромиздат, 1946. 286 с.
12. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. М.: Высш. шк., 1967. 600 с.
13. Журавлева, В. П. Массотеплоперенос при термообработке и сушке капиллярно-пористых строительных материалов / В. П. Журавлева. Минск: Наука и техника, 1972. 192 с.
14. Олышанский, А. И. Аналитический расчет температуры в процессе сушки тонких капиллярно-пористых плоских материалов / А. И. Олышанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2018. Т. 63, № 3. С. 333–341. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-333-341>.
15. Олышанский, А. И. Температура материала в процессе конвективной сушки тонких материалов в периоде падающей скорости сушки / А. И. Олышанский, А. М. Гусаров // Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 93, № 2. С. 378–383.
16. Олышанский, А. И. Экспериментальные исследования тепловлагообмена в процессе конвективной сушки тонких влажных материалов / А. И. Олышанский, 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>.
17. Франчук, А. У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов / А. У. Франчук. М.: НИИ строительной физики, 1969. 143 с.
18. Блази, В. Строительная физика: справ. проектировщика. М.: Техносфера, 2005. 536 с.
19. Физические величины / под ред. И. С. Григорьева, Е. Х. Меймехова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
20. Колесников, П. А. Теплозащитные свойства одежды / П. А. Колесников. М.: Легкая индустрия, 1965. 337 с.

Поступила 22.03.2024 Подписана в печать 23.05.2024 Опубликовано онлайн 29.11.2024

REFERENCES

1. Lykov A. V. (1968) *Drying Theory*. Moscow, Energiya Publ. 472 (in Russian).
2. Krasnikov V. V. (1973) *Conductive Drying*. Moscow, Energiya Publ. 288 (in Russian).
3. Akulich P. V. (2010) *Calculations of Drying and Heat Exchange Installations*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 443 (in Russian).
4. Rudobashta S. P. (1980) *Mass-and-Heat Transfer in Solid-Phase Systems*. Moscow, Khimiya Publ. 248 (in Russian).
5. Lykov A. V., Kuts P. S., Ol'shanskii A. I. (1972) Kinetics of Heat Transfer during the Desiccation of Moist Materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 23, 1082–1086. <https://doi.org/10.1007/BF00832214>.
6. Vasilyev V. N., Kutsakova V. E., Frolov S. V. (2013) *Drying Technology. Basics of Heat and Mass Transfer*. Saint-Petersburg, Giord Publ. 224 (in Russian).
7. 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, 622–633. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0876-1>.
8. Kuts P. S., Ol'shanskii A. I. (1975) Approximate Method of Calculating the Kinetics of Convective Drying of Flat Materials. *Journal of Engineering Physics*, 28 (4), 419–422. <https://doi.org/10.1007/bf00878212>.
9. Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. (2023) Investigation of the Kinetics of Heat and Moisture Exchange during Heat Treatment and Drying of Thin Wet Thermal Insulation Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (1), 66–79. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-66-79> (in Russian).
10. Lykov A. V. (1961) *Theoretical Foundations of Construction Thermophysics*. Minsk, AN BSSR Publ. 519 (in Russian).
11. Lykov A. V. (1946) *Theory of Drying Capillary-Porous Colloidal Materials of the Food Industry*. Moscow, Pishchepromizdat Publ. 286 (in Russian).
12. Lykov A. V. (1967) *Theory of Thermal Conductivity*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 600 (in Russian).
13. Zhuravleva V. P. (1972) *Mass Transfer in the Course of Heat Treatment and Drying of Capillary-Porous Building Materials*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ. 192 (in Russian).
14. Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V., Gusarov A. M. (2018) Calculation of the Kinetics of Heat Transfer Using the Experimental Data of Moisture Exchange in the Process of Convective Drying of Thin Flat Materials. *Vesti Natsyonal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, 63 (3), 333–341. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-333-341> (in Russian).
15. Ol'shanskii A. I., Gusarov A. M. (2020) Temperature of Material in the Process of Convective Drying of Thin Materials in the Falling Rate Period of Drying. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 93, 364–368. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02129-0>.
16. 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. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-564-578> (in Russian).
17. Franchuk A. U. (1969) *Tables of Thermal Performance of Construction Materials*. Moscow, Research Institute of Construction Physics Publ. 143 pp. (in Russian).
18. Blazi V. (2005) *Construction Physics: Designer's Handbook*. Moscow, Tekhnosfera Publ. 536 (in Russian).
19. Grigoriev I. S., Meimekhov E. Kh. (eds.) (1991) *Physical Quantities*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1232 (in Russian).
20. Kolesnikov P. A. (1965) *Thermal Protection Properties of Clothing*. Moscow, Legkaya Industriya Publ. 337 (in Russian).