

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-44-56>

УДК 66.047.7

*Оригинальная статья***А. И. Ольшанский, А. А. Котов, С. М. Кузьменков****Витебский государственный технологический университет,
Московский пр., 72, 210038, Витебск, Республика Беларусь***КИНЕТИКА ВЛАГООБМЕНА И ТЕМПЕРАТУРА В ПРОЦЕССЕ
КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ТОНКИХ ПЛОСКИХ ВЛАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Аннотация. Изложены основные закономерности кинетики сушки тонких плоских материалов в период падающей скорости сушки. Приведен метод расчета среднеинтегральной температуры влажного материала на основе относительного температурного коэффициента сушки. Выполнена обработка опытных данных на основе полученных значений 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. Приводится расчет коэффициента теплоотдачи. На основе изучения 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. Результаты сопоставления экспериментальных значений температур с расчетными аналитическими значениями указывают на более широкое применение дифференциальных уравнений теплового переноса для практических задач сушки различных влажных материалов.

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Ольшанский Анатолий Иосифович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теплоэнергетика» Витебского государственного технологического университета. <https://orcid.org/0009-0009-0000-6799>; *Котов Алексей Анатольевич* – ассистент кафедры «Теплоэнергетика» Витебского государственного технологического университета. E-mail: tm@vstu.by; *Кузьменков Сергей Михайлович* – ассистент кафедры «Технология машиностроения» Витебского государственного технологического университета. E-mail: tm@vstu.by

Вклад авторов: *Ольшанский Анатолий Иосифович* – сбор и анализ литературных данных, вывод зависимостей, проведение вычислений, написание текста рукописи, обсуждение результатов и выводов; *Котов Алексей Анатольевич* – работа с графическим материалом, оформление, редактирование текста рукописи, обсуждение результатов и выводов; *Кузьменков Сергей Михайлович* – перевод, редактирование текста рукописи, обсуждение результатов и выводов.

Для цитирования: Ольшанский, А. И. Кинетика влагообмена и температура в процессе конвективной сушки тонких плоских влажных материалов / А. И. Ольшанский, А. А. Котов, С. М. Кузьменков // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 44–56. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-44-56>

Поступила в редакцию: 14.03.2024

Доработанный вариант: 26.12.2024

Утверждена к публикации: 06.03.2025

Подписана в печать: 12.03.2025

Original article

Anatoly I. Ol'shanskii, Alexej A. Kotow, Sergey M. Kuzmenkov*

Vitebsk State Technological University,
72, Moskovsky Ave., 210038, Vitebsk, Republic of Belarus

**MOISTURE EXCHANGE KINETICS AND TEMPERATURE DURING THE PROCESS
OF CONVECTIVE DRYING OF THIN FLAT WET MATERIALS**

Abstract. The basic laws of drying kinetics of thin flat materials during the falling drying rate 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 data were processed based on the obtained values of 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 heat conduction for a wet plate in the process of drying (falling velocity period) with boundary conditions taking into account drying conditions is given. The calculation of the heat transfer coefficient is presented. Based on the study of many sources and processing of experimental results, formulas for calculating the coefficient of thermal conductivity of wet materials are 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 changes from an exponential dependence to a linear one, which is in full agreement with the experiment. A comparison of the temperature calculation by the experimental formula with the results of analytical solutions is presented. The analytical solution confirmed the laws established experimentally. Quite reliable coincidence of experimental and calculated analytical values of temperature for the period of falling speed drying of ceramics, asbestos, and fabric is obtained. The results of comparing experimental temperature values with calculated analytical values indicate a wider application of differential heat transfer equations for practical tasks of drying various wet materials.

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

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Information about the authors: Anatoly I. Ol'shanskii – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Heat Power Engineering at Vitebsk State Technological University. <https://orcid.org/0009-0009-0000-6799>; Alexej A. Kotow – Assistant of the Department of Heat Power Engineering at Vitebsk State Technological University. E-mail: tm@vstu.by; Sergey M. Kuzmenkov – Assistant of the Department of Mechanical Engineering at Vitebsk State Technological University. E-mail: tm@vstu.by

Contribution of the authors: Anatoly I. Ol'shanskii – collection and analysis of literature data, derivation of dependencies, carrying out calculations, writing the text of the manuscript, discussion of results and conclusions; Alexej A. Kotow – work with graphic material, design, editing of the text of the manuscript, discussion of results and conclusions; Sergey M. Kuzmenkov – translation, editing of the text of the manuscript, discussion of results and conclusions.

For citation: Ol'shanskii A. I., Kotow A. A., Kuzmenkov S. M. Moisture exchange kinetics and temperature during the process of convective drying of thin flat wet materials. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 44–56 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-44-56>

Received: 14.03.2024

Modified: 26.12.2024

Approved for publication: 06.03.2025

Signed to the press: 12.03.2025

Введение. Температура материала является важным параметром сушки, определяющим технологические качества готового продукта. Для ее определения 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].

Однако в большинстве случаев задача получается достаточно сложной в аналитическом отношении, так как является существенно нелинейной. Поэтому для практики сушки представляют интерес приближенные экспериментальные уравнения, полученные на основе обработки большого числа опытных данных [1–4]. 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, можно использовать результаты этих решений для расчета кинетики сушки конкретных влажных материалов [5–8].

Постановка задачи. Аналитические решения имеют большое значение в том случае, когда они согласуются с закономерностями, установленными экспериментальным путем.

Цель работы – провести анализ опытных данных и сопоставить итоговые значения с результатами аналитических решений.

Кинетика сушки. Конвективная сушка тонких материалов проводилась нагретым воздухом со следующими постоянными параметрами: температура (t_c , °C), скорость движения (v , м/с) и 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 $t_c = 90\text{--}120$ °C и скорости $v = 3\text{--}5$ м/с относятся к достаточно «мягким» режимам без резких скачков температуры.

На основе обработки опытных данных для процессов сушки керамики, листового асбеста и шерстяной ткани были построены графические зависимости, изображенные на рис. 1 и 2.

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

В процессе сушки влажных материалов влагосодержание вначале уменьшается линейно до гигроскопического $\bar{u}_{кр}$. Когда влагосодержание $\bar{u} < \bar{u}_{кр}$, начинается период падающей скорости сушки. Период постоянной скорости сушки принято называть первым, а период падающей скорости – вторым [2, 3]. Отличительной особенностью сушки капиллярно-пористых материалов (керамики и асбеста) является наличие и периода постоянной температуры на уровне температуры мокрого термометра t_m [1–4] (см. рис. 1). Кривая сушки $\bar{u} = f(\tau)$ во втором периоде представляет экспоненциальную зависимость [1, 2]. При сушке тканей (см. рис. 2) температура увеличивается с начала сушки по экспоненциальному закону и с уменьшением влагосодержания ($\bar{u}$) плавно переходит в линейную зависимость. При сушке керамики и асбеста (см. рис. 1) к концу процесса температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ переходят в линейные зависимости.

Рассмотрим основные положения кинетики сушки, необходимые для расчета температуры в период падающей скорости сушки. Относительная скорость сушки (N^*) устанавливается зависимостью [1–4]

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

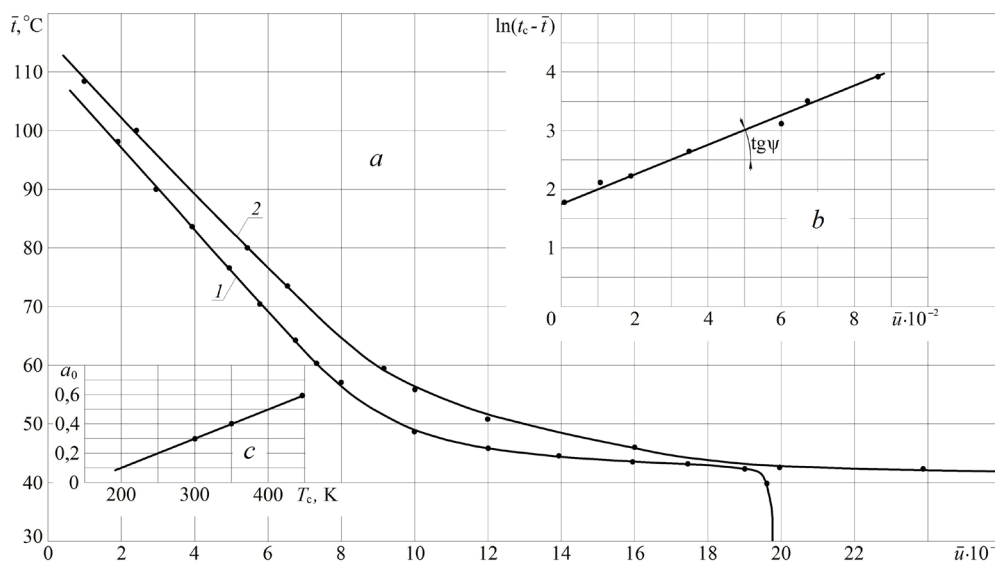


Рис. 1. Температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ (a) в процессе сушки керамической пластины (кривая 1) и листового асбеста (кривая 2) при режиме сушки: $t_c = 120$ °C, $v = 5$ м/с, $\phi = 5$ % и зависимости $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\bar{u})$ (b), коэффициента $a_0 = f(T_c)$ (c) в процессе сушки керамической плитки (для режимов сушки: $t_c = 90\text{--}120$ °C; $v = 3\text{--}5$ м/с)

Fig. 1. Temperature curves $\bar{t} = f(\bar{u})$ (a) during the drying of ceramic plate (curve 1) and asbestos sheet (curve 2) under the drying mode: $t_c = 120$ °C, $v = 5$ 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 (for drying modes: $t_c = 90\text{--}120$ °C; $v = 3\text{--}5$ m/s)

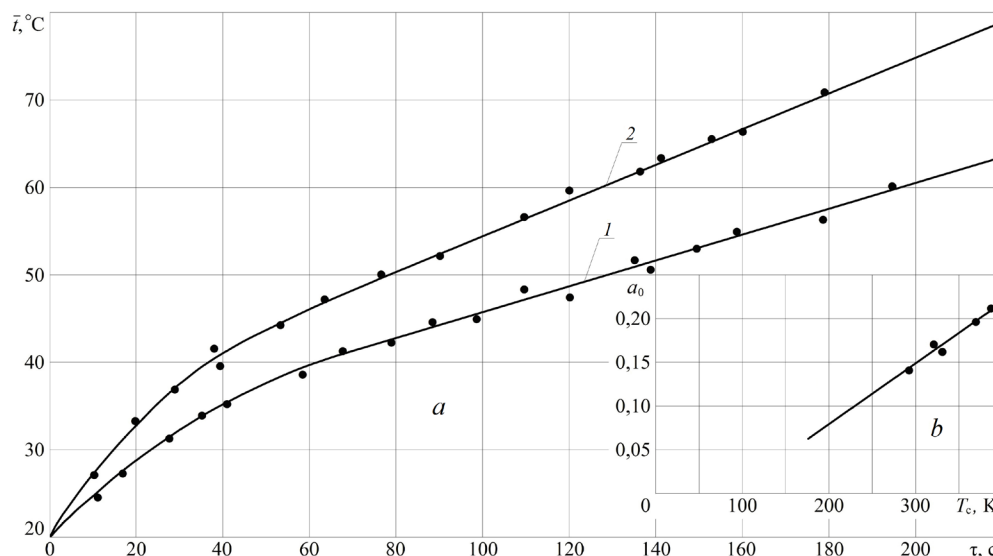


Рис. 2. Температурные кривые $\bar{t} = f(\tau)$ (а) при сушке шерстяной ткани для двух режимов сушки: $t_c = 65^\circ\text{C}$, $v = 1\text{ м/с}$, $\phi = 10\%$ (кривая 1), $t_c = 90^\circ\text{C}$, $v = 5\text{ м/с}$, $\phi = 6\%$ (кривая 2); зависимость коэффициента $a_0 = f(T_c)$ (б)
 Fig. 2. Temperature curves $\bar{t} = f(\tau)$ (a) when drying woolen fabric for two drying modes: $t_c = 65^\circ\text{C}$, $v = 1\text{ m/s}$, $\phi = 10\%$ (curve 1), $t_c = 90^\circ\text{C}$, $v = 5\text{ m/s}$, $\phi = 6\%$ (curve 2); the dependence of the coefficient $a_0 = f(T_c)$ (b)

где N – скорость сушки в первом периоде. Скорость сушки во втором периоде определяется формулой [1–3]

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

где K – коэффициент сушки, u_p – равновесное влагосодержание материала. Величина N^* не зависит от режима сушки и является только функцией влагосодержания [1–3].

Для тканей при отсутствии периода постоянной скорости сушки скорость сушки равна максимальной [1, 9]:

$$N_{\text{макс}} = \left(\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right)_{\text{макс}}.$$

Обработкой опытных данных по сушке значительного количества образцов разнородных влажных материалов различными методами сушки получена общая зависимость для относительной скорости сушки [5]

$$\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{\text{кр}}} = N^{*0,57}, \quad (3)$$

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

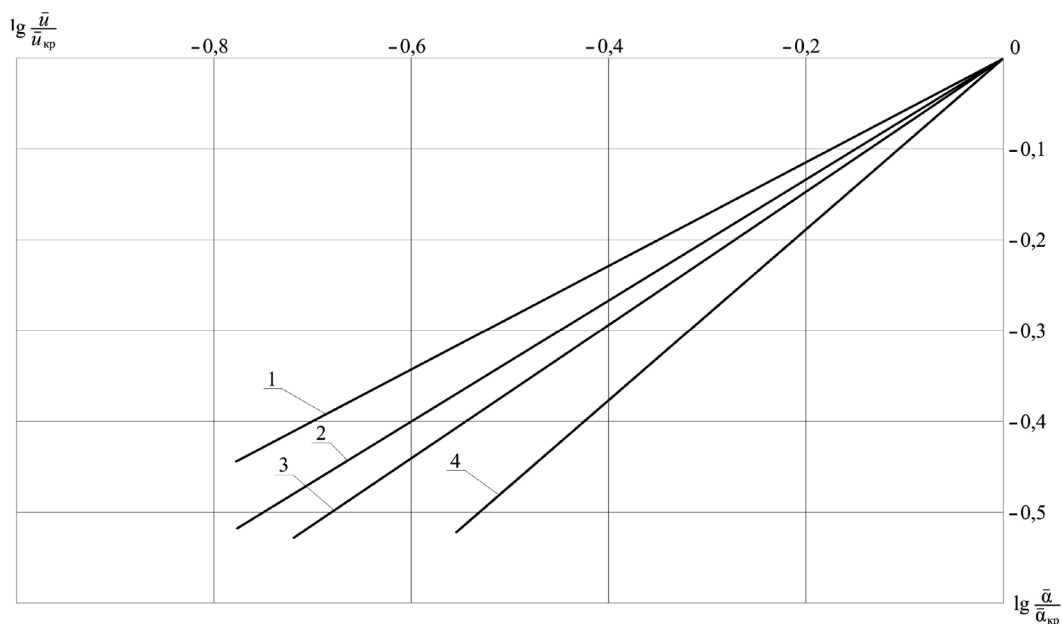
П. Д. Лебедевым [1–4] было предложено изменение коэффициента теплоотдачи во втором периоде учитывать соотношением

$$\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{\text{кр}}} = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right)^n, \quad (4)$$

где n – постоянная, определяемая экспериментально. При сушке тканей соотношение (4) принимает вид

$$\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{\text{макс}}} = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_0} \right)^n, \quad (5)$$

здесь $\bar{\alpha}_{\text{макс}}$ – максимальное значение коэффициента теплоотдачи, $\bar{u}_0$ – начальное влагосодержание материала.

Рис. 3. Зависимость $\lg \bar{u}/\bar{u}_{кр}$ от $\lg \bar{\alpha}/\bar{\alpha}_{кр}$ для сушки асбеста (1), войлока (2), керамики (3) и глины (4)Fig. 3. Dependence of $\lg \bar{u}/\bar{u}_{кр}$ on $\lg \bar{\alpha}/\bar{\alpha}_{кр}$ for drying asbestos (1), felt (2), ceramics (3) and clay (4)

На рис. 3 дана графіческая залежність $\lg \bar{u}/\bar{u}_{кр}$ від $\lg \bar{\alpha}/\bar{\alpha}_{кр}$ для процесів сушки кераміки, листового асбеста, шерстяного войлока і глини. Из графічної залежності (рис. 3) визначаються постійні n в рівняннях (4) і (5) по співвідношенню

$$n = \frac{\lg(\bar{\alpha} / \bar{\alpha}_{кр})}{\lg(\bar{u} / \bar{u}_{кр})}.$$

Для тканин $\bar{u}_{кр} = \bar{u}_0$.

Постійна n в рівнянні (4) приймає значення: для асбеста $n \approx 0,72$, для войлока $n \approx 0,71$, для кераміки $n \approx 0,74$, для глини $n \approx 0,9$. При сушці тканин і сукна $n \approx 0,42$ [1].

На основі (4) і (5) для відносної швидкості сушки N^* можна записати

$$N^* \approx \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{\frac{n}{0,57}}. \quad (6)$$

Для спрощення розрахунків сушки кераміки, асбеста і войлока з погрешністю в 2 % приймаємо для цих матеріалів середнє значення постійної $n = 0,695$. Підставляючи прийнятую величину $n = 0,695$ в рівняння (6), отримаємо

$$N^* \approx \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1,22}. \quad (7)$$

При сушці глини показник степені в (7) приймає значення 1,58, тканин і сукна – 0,74.

Для перевірки достовірності формули (7) була проведена обробка експериментальних кривих сушки і кривих швидкості сушки кераміки, асбеста і войлока в широкому діапазоні режимів. В результаті отримана залежність, яка апроксимується наближеною формулою

$$N^* \approx \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1,3}. \quad (8)$$

Сопоставление формул (7) и (8), полученных разными методами обработки опытных данных, дает погрешность в 4 %, что находится в области погрешности эксперимента.

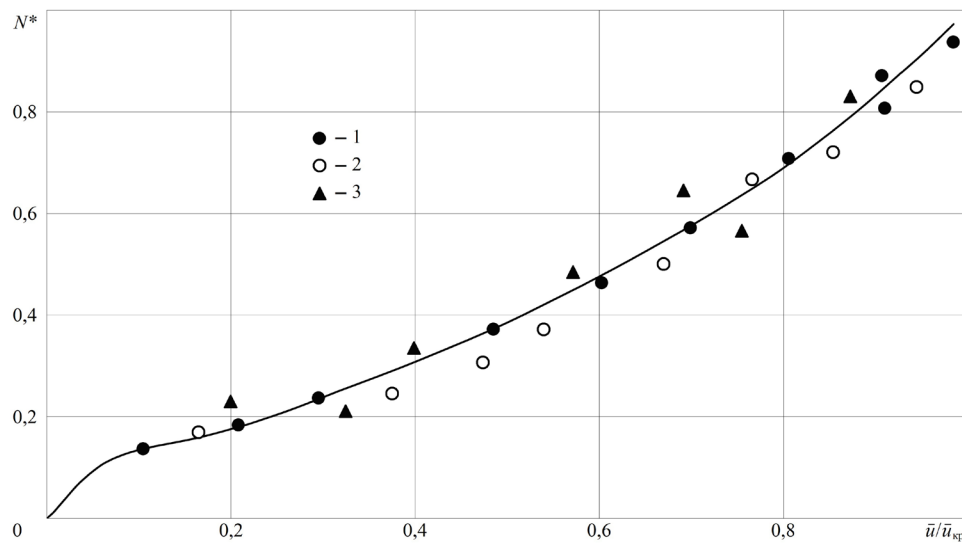


Рис. 4. Зависимость относительной скорости сушки N^* от относительного влагосодержания $\bar{u}/\bar{u}_{кр}$ для сушки керамики (1), листового асбеста (2) и шерстяного войлока (3)

Fig. 4. The dependence of the relative drying rate N^* on the relative moisture content $\bar{u}/\bar{u}_{кр}$ for drying ceramics (1), asbestos sheets (2) and wool felt (3)

На рис. 4 даны результаты обработки эксперимента для зависимости $N^* = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$.

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

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} = N \cdot N^*, \quad (9)$$

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

Исходя из выражений (2) и (8) коэффициент сушки K равен

$$K = \frac{N \cdot N^*}{\bar{u} - u_p} = \frac{N \cdot (\bar{u}/\bar{u}_{кр})^{1,22}}{\bar{u} - u_p}. \quad (10)$$

Следовательно, коэффициент сушки K во втором периоде величина переменная.

Для расчета средней температуры материала во втором периоде сушки А. В. Лыковым [1, 5, 6–8] был введен в кинетику сушки относительный температурный коэффициент сушки:

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

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 $\bar{t} = f(\bar{u})$.

В свою очередь относительный температурный коэффициент сушки B является наиболее общей характеристикой процесса, определяющей закономерности изменения температуры во втором периоде [1, 5, 6, 8]. Для большого ряда капиллярно-пористых материалов зависимость $B = f(\bar{u})$ выражается эмпирической формулой [1, 2, 5–7]

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

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

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

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

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

Коэффициент a_0 является линейной функцией абсолютной температуры. Постоянная m находится построением графической зависимости $\ln(t_c - \bar{t}_1) = f(\bar{u})$. Если отложить по оси ординат величину $\ln(t_c - \bar{t}_1)$, а по оси абсцисс – влагосодержание $\bar{u}$, то получим прямую, тангенс угла наклона которой к оси $\bar{u}$ равен величине постоянной m [1, 11]:

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

На рис. 1, *b* изображена такая зависимость для процесса сушки керамической пластины, а на рис. 1, *c* и 2, *b* 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.

Т а б л и ц а 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

Table 1. 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 Material	$\bar{u}_0$	$\bar{u}_{кр}$	Параметры режимов сушки Parameters of drying modes			m	a_0
			$t_c, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м/с}$ $v, \text{m/s}$	$\varphi, \%$		
Керамическая плитка, $\delta = 5 \text{ мм}$ Ceramic tiles, $\delta = 5 \text{ мм}$	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, $\delta = 6 \text{ мм}$ Sheet asbestos, $\delta = 6 \text{ мм}$	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, $\delta = 8 \text{ мм}$ Wool felt, $\delta = 8 \text{ мм}$	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, $\delta = 4,5 \text{ мм}$ Technical cardboard, $\delta = 4,5 \text{ мм}$	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, $\delta = 0,6–0,8 \text{ мм}$ Woolen fabric, $\delta = 0,6–0,8 \text{ мм}$	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 линейную [1]. При этом температурные коэффициенты сушки $b = d\bar{t}/d\bar{u} = \text{const}$ и $B = b \cdot \bar{u}_{кр}/T_c = \text{const}$, а коэффициент $a_0 = B$ [1, 2]. Тогда линейное уравнение температурной кривой будет иметь вид [10, 11, 17, 18]

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

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

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

На основе изучения многих процессов сушки различных капиллярно-пористых материалов А. В. Лыков полагал, что зависимость между средней температурой $\bar{t}$ и влагосодержанием $\bar{u}$ может быть линейной [1, 10–12] и выражаться формулой (16). Например, для такого типичного капиллярно-пористого тела, как пористая керамика, при сушке в режимах $t_c = 60$ °С, $\varphi = 10$ % и $t_c = 80$ °С, $\varphi = 6$ % и скорости воздуха $v \approx 0,5–0,8$ 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 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 $\bar{u}_0 \approx 1,1–1,3$. При сушке тканей как очень тонких материалов (толщина $\delta \approx 0,4–1,6$ мм) расход тепла на нагревание влажного тела значительно ниже расхода тепла на испарение из него влаги [1, 9, 11].

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 ($t_c = 120$ °С, $v = 5$ м/с) для области влагосодержаний $\bar{u} \approx 0,06–0,025$ по формуле (12) дает значение $B \approx 0,21$, по экспериментальным данным [7, 8] $B = 0,214$. Коэффициент b_0 уравнения (16) зависит от температурного коэффициента сушки $b = d\bar{t}/d\bar{u}$, точность определения которого задается погрешностью графического дифференцирования температурной кривой $\bar{t} = f(\bar{u})$. Экспериментальное значение $b_0 \approx 590$ °С ($\bar{u} = 0,08$) по уравнению (16) хорошо согласуется со значением (597 °С), полученным из решения аналитического уравнения (22) при $\bar{u} = 0,08$.

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

- 1) $t_c = 100$ °С, $B \approx 0,08$;
- 2) $t_c = 150$ °С, $B \approx 0,11$;
- 3) $t_c = 200$ °С, $B \approx 0,23$.

Эти значения коэффициента B согласуются со значениями опытных данных в [14, 15].

Из решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности для неограниченной пластины А. В. Лыковым получено уравнение для параметра b_0 [11, 12, 16].

Для аналитического определения средней температуры воспользуемся дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности А. В. Лыкова [10–12]. Уравнение теплопроводности при $\tau = 0$, $t = t_m$ принимает следующий вид:

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

при $x = \pm R$:

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

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

Для тонких материалов скорость сушки – экспоненциальная функция времени, определяемая по выражению

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

Интегрирование (19) для периода падающей скорости сушки рассчитывается следующим образом:

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

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, которые учитывают скорость сушки в периоде падающей скорости, получено уравнение

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

где $c_{вл}$ – удельная теплоемкость влажного тела, Дж/(кг·°C).

Обозначим через b_0 часть уравнения (21):

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

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

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

Комплекс Z [11] определяет интенсивность теплообмена при взаимодействии поверхности пластины с окружающей средой:

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

Решение справедливо, если $Z > K$. Подставляя (23) в (21), получим уравнение температурной кривой

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

Из уравнений (15), (16) и (23) следует

$$b_0 \approx \frac{rK}{c_{вл}(Z - K)} \approx \frac{BT_c}{\bar{u}_{кр}}.$$

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

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

где Re – число Рейнольдса; T_m – абсолютная температура мокрого термометра; C – коэффициент, который принимает значения: для керамики $C = 0,75$, для асбеста $C = 0,70$, для тканей $C = 0,89$; коэффициент $n = 0,74$ для керамики, $n = 0,72$ для асбеста, $n = 0,71$ для войлока, $n = 0,42$ для тканей.

Коэффициент теплоотдачи определяется выражением

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

где $\lambda_{воз}$ – коэффициент теплопроводности воздуха по таблицам [3], Вт/(м·°C); l – длина образца материала по направлению набегания потока воздуха, м.

При сушке влажных материалов влагосодержание уменьшается, а температура увеличивается, поэтому все теплофизические коэффициенты изменяются. Наибольшее изменение претерпе-

васт 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 [1, 3]

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

где c_0 – удельная теплоемкость сухого тела, Дж/(кг·°C); $c_{\text{в}}$ – теплоемкость воды, Дж/(кг·°C). Коэффициенты теплопроводности сухих материалов λ_0 почти не зависят от температуры в области от 30 до 90 °C [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, 19–22] 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·°C); для асбеста $A_0 = 0,03$, $B_0 = 2$, $\lambda_0 = 0,12$ Вт/(м·°C).

Коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{вл}}$ для шерстяных тканей и шерстяного строительного войлока практически не зависит от температуры до $t \approx 90$ °C. Зависимость $\lambda_{\text{вл}}$ для шерстяных тканей и войлока от влагосодержания хорошо изучена [19–22] 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 [22]

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

Значения средних температур для процессов сушки керамической плитки, листового асбеста и шерстяной ткани, вычисленные 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 в 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
 Table 2. 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 × 80 × 5 мм; ρ = 1840 кг/м ³ ; λ ₀ = 0,8 Вт/(м·°C); c ₀ = 860 Дж/(кг·°C); $\bar{u}_0 = 0,2$; $\bar{u}_{\text{кр}} = 0,1$; u _p = 0. Режим сушки: t _c = 120 °C; v = 5 м/с; φ = 5 %; t _m = 50 °C; N = 0,0185 мин ⁻¹ Ceramic tiles: 120 × 80 × 5 mm; ρ = 1840 kg/m ³ ; λ ₀ = 0.8 W/(m·°C); c ₀ = 860 J/(kg·°C); $\bar{u}_0 = 0.2$; $\bar{u}_{\text{кр}} = 0.1$; u _p = 0. Drying mode: t _c = 120 °C; v = 5 m/s; φ = 5 %; t _m = 50 °C; N = 0.0185 min ⁻¹											
$\bar{u}$	$\bar{\alpha}$, Вт/(м ² ·°C) (26)	$\lambda_{\text{вл}}$, Вт/(м·°C) (28)	N^* (7)	Z , мин ⁻¹ (24)	K , мин ⁻¹ (10)	b_0 , °C экс (16)	b_0 , °C (23)	$\bar{t}$, °C экс (13)	$\bar{t}$, °C (15)	$\bar{t}$, °C (25)	
0,08	63,5	0,79	0,82	0,69	0,184	750	870	60	62	55	
0,07	55,4	0,75	0,73	0,62	0,185	785	860	65	65	62	
0,06	46,4	0,72	0,64	0,67	0,192	800	870	72	69	70	

Окончание табл. 2

$\bar{u}$	$\bar{a}$, Вт/(м ² ·°C) (26)	$\lambda_{\text{вл.}}$, Вт/(м·°C) (28)	N^* (7)	Z , мин ⁻¹ (24)	K , мин ⁻¹ (10)	b_0 , °C экс (16)	b_0 , °C (23)	$\bar{t}$, °C экс (13)	$\bar{t}$, °C (15)	$\bar{t}$, °C (25)
0,05	41,6	0,68	0,54	0,65	0,200	770	870	80	77	77
0,04	38,4	0,64	0,45	0,68	0,210	870	880	85	82	85
0,03	30,8	0,60	0,36	0,67	0,215	867	880	98	94	95
0,02	23,6	0,57	0,24	0,68	0,220	960	890	100	100	103
Листовой асбест: 120 × 80 × 6 мм; $\rho = 770$ кг/м ³ ; $\lambda_0 = 0,123$ Вт/(м·°C); $c_0 = 825$ Дж/(кг·°C); $\bar{u}_0 = 0,46$; $\bar{u}_{\text{кр}} = 0,20$; $u_p = 0$. Режим сушки: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %; $t_m = 42$ °C; $N = 0,028$ мин ⁻¹ Sheet asbestos: 120 × 80 × 6 mm; $\rho = 770$ kg/m ³ ; $\lambda_0 = 0,123$ W/(m·°C); $c_0 = 825$ J/(kg·°C); $\bar{u}_0 = 0,46$; $\bar{u}_{\text{кр}} = 0,20$; $u_p = 0$. Drying mode: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ m/s; $\varphi = 5$ %; $t_m = 42$ °C; $N = 0,028$ min ⁻¹										
$\bar{u}$	$\bar{a}$, Вт/(м ² ·°C) (26)	$\lambda_{\text{вл.}}$, Вт/(м·°C) (28)	N^* (7)	Z , мин ⁻¹ (24)	K , мин ⁻¹ (10)	b_0 , °C экс (16)	b_0 , °C (23)	$\bar{t}$, °C экс (13)	$\bar{t}$, °C (15)	$\bar{t}$, °C (25)
0,16	36,2	0,328	0,82	0,61	0,140	430	450	52	54	54
0,14	33,3	0,289	0,73	0,60	0,140	455	470	57	57	55
0,10	31,6	0,252	0,54	0,71	0,150	550	510	65	62	64
0,08	28,4	0,212	0,45	0,69	0,155	580	550	72	70	72
0,04	20,8	0,174	0,24	0,78	0,165	610	600	86	84	—
0,02	18,6	0,135	0,14	0,80	0,180	660	680	100	99	—
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; $\varphi = 6$ %; $N_{\text{макс}} = 0,016$ с ⁻¹ Woolen fabric: $\delta = 0,6 \cdot 10^{-3}$ m; $\rho = 200$ kg/m ³ ; $\lambda_0 = 0,046$ W/(m·°C); $c_0 = 1300$ J/(kg·°C); $\bar{u}_0 = 1,12$; $u_p = 0,002$. Drying mode: $t_c = 90$ °C; $v = 5$ m/s; $\varphi = 6$ %; $N_{\text{макс}} = 0,016$ s ⁻¹										
$\bar{u}$	$\bar{a}$, Вт/(м ² ·°C) (26)	$\lambda_{\text{вл.}}$, Вт/(м·°C) (28)	N^* (7)	Z , с ⁻¹ (24)	K , с ⁻¹ (10)	b_0 , °C экс (16)	b_0 , °C (23)	$\bar{t}$, °C экс (14)	$\bar{t}$, °C (16)	$\bar{t}$, °C (25)
0,7	32,7	0,328	0,72	0,120	0,016	85	90	34	34	30
0,6	30,8	0,289	0,65	0,131	0,017	89	94	38	37	35
0,5	26,4	0,252	0,57	0,127	0,018	92	96	45	44	42
0,4	25,4	0,212	0,50	0,168	0,020	102	98	48	52	51
0,3	23,5	0,175	0,39	0,220	0,021	105	99	56	61	59
0,2	22,4	0,142	0,29	0,260	0,022	115	110	67	71	67

Заключение. Рассмотренные закономерности изменения температуры в периоде падающей скорости сушки показали, что температурная кривая в этом периоде представляет сложную экспоненциальную зависимость, переходящую при уменьшении влагосодержания в пологую экспоненту, близкую к линейной. Аналитическое решение задачи подтверждает закономерности изменения температуры, установленные опытным путем.

Анализ проведенного исследования характера закономерности изменения температуры в процессах сушки влажных материалов и сопоставление полученных экспериментальных значений температуры с аналитическими указывает на необходимость более широкого использования аналитических решений дифференциальных уравнений в процессах сушки различных материалов, что имеет практическое значение.

Список использованных источников

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: Беларус. навука, 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. Ольшанский // 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. Ольшанский, А. И. Кинетика теплообмена и экспериментальные методы расчета температуры материала в процессе сушки / А. И. Ольшанский // 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. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. – 1975. – Т. 28, № 4. – С. 594–598.
9. Ольшанский, А. И. Кинетика тепловлагопереноса и температура в процессе сушки тканей / А. И. Ольшанский, А. С. Марущак // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2021. – Т. 66, № 4. – С. 449–457. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-449-457>
10. Лыков, А. В. Теоретические основы строительной теплофизики / А. В. Лыков. – Минск: Изд-во 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. Ольшанский, А. И. Аналитический расчет температуры в процессе сушки тонких капиллярно-пористых плоских материалов / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2018. – Т. 63, № 3. – С. 333–341. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-333-341>
15. Ольшанский, А. И. Температура материала в процессе конвективной сушки тонких материалов в периоде падающей скорости сушки / А. И. Ольшанский, А. М. Гусаров // Инженерно-физический журнал. – 2020. – Т. 93, № 2. – С. 378–383.
16. Рудобашта, С. П. Расчет кинетики сушки дисперсных материалов на основе аналитических методов // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83, № 4. – С. 705–714.
17. Натарева, О. С. Теплоперенос в процессе конвективной сушки влажного материала / О. С. Натарева, Н. Р. Коккина, С. В. Натарева // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58, вып. 2. – С. 67–72.
18. Кошелева, М. К. Особенности процесса сушки нетканых текстильных материалов / М. К. Кошелева, С. П. Рудобашта // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сб. науч. ст. Первых Междунар. Лыковских науч. чтений (22–23 сент. 2015 г.) / РГАУ–МСХА имени К. А. Тимирязева. – М.: Университет. книга, 2015. – С. 205–210.
19. Франчук, А. У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов / А. У. Франчук. – М.: НИИ строительной физики, 1969. – 143 с.
20. Блази, В. Строительная физика: справ. проектировщика. – М.: Техносфера, 2005. – 536 с.
21. Физические величины / под ред. И. С. Григорьева, Е. Х. Меймехова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
22. Колесников, П. А. Теплозащитные свойства одежды / П. А. Колесников. – М.: Легкая индустрия, 1965. – 337 с.

References

1. Lykov A. V. *Drying Theory*. Moscow, Energiya Publ., 1968. 472 p. (in Russian).
2. Krasnikov V. V. *Conductive Drying*. Moscow, Energiya Publ., 1973. 288 p. (in Russian).
3. Akulich P. V. *Calculations of Drying and Heat Exchange Installations*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2010. 443 p. (in Russian).
4. Rudobashta S. P. *Mass-Heat Transfer in Solid-Phase Systems*. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 248 p. (in Russian).
5. Lykov A. V., Kuts P. S., Olshansky A. I. Kinetics of heat transfer during the desiccation of moist materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1972, vol. 23, iss. 3, pp. 1082–1086. <https://doi.org/10.1007/BF00832214>
6. Vasilyev V. N., Kutsakova V. E., Frolov S. V. *Drying Technology. Basics of Heat and Mass Transfer*. St. Petersburg, GIOR Publ., 2013. 224 p. (in Russian).
7. Ol'shanskii A. I. Heat transfer kinetics and experimental methods for calculating the material temperature in the drying process. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, iss. 3, pp. 622–633. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0876-1>
8. Kuts P. S., Ol'shanskii A. I. Approximate method of calculating the kinetics of convective drying of flat materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1975, vol. 28, iss. 4, pp. 419–422. <https://doi.org/10.1007/BF00878212>
9. Ol'shanskii A. I., Marushchak A. S. Heat and moisture transfer kinetics and temperature during drying of fabrics. *Vesti Natsyional'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 4, pp. 449–457 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-449-457>
10. Lykov A. V. *Theoretical Foundations of Construction Thermophysics*. Minsk, Academy of Sciences of the Belarusian SSR, Publ., 1961. 519 p. (in Russian).
11. Lykov A. V. *Theory of Drying Capillary-Porous Colloidal Materials of the Food Industry*. Moscow, Pishhepromizdat Publ., 1946. 286 p. (in Russian).
12. Lykov A. V. *Theory of Thermal Conductivity*. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1967. 600 p. (in Russian).
13. Zhuravleva V. P. *Mass Transfer in the Course of Heat Treatment and Drying of Capillary-Porous Building Materials*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1972. 192 p. (in Russian).
14. Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V., Gusarov A. M. 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 Natsyional'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 333–341 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-333-341>

15. Ol'shanskii A. I., Gusarov A. M. 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*, 2020, vol. 93, iss. 2, pp. 364–368. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02129-0>
16. Rudobashta S. P. Calculation of the kinetics of drying disperse materials on the basis of analytical methods. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2010, vol. 83, iss. 4, pp. 753–763. <https://doi.org/10.1007/s10891-010-0394-3>
17. Natariev O. S., Kokina N. R., Natariev S. V. Heat transfer in the process convective drying of wet material. *Izvestija vuzov. Himija i himicheskaja tehnologija = ChemChemTech*, 2015, vol. 58, iss. 2, pp. 67–72 (in Russian).
18. Kosheleva M. K., Rudobashta S. P. The features of the drying process of nonwoven textile materials. *Actual Problems of Drying and Thermal-Humidification Processing of Materials in Various Industries and Agricultural Complex: Collection of Scientific Articles of the First International Lykov Scientific Readings (September 22–23, 2015)*. Moscow, Universitetskaya kniga Publ., 2015, pp. 205–210 (in Russian).
19. Franchuk A. U. *Tables of Thermal Performance of Construction Materials*. Moscow, Research Institute of Construction Physics Publ., 1969. 143 p. (in Russian).
20. Blazi V. *Construction Physics: Designer's Handbook*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 536 p. (in Russian).
21. Grigoriev I. S., Meimekhov E. Kh. (eds.). *Physical Quantities*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 1232 p. (in Russian).
22. Kolesnikov P. A. *Thermal Protection Properties of Clothing*. Moscow, Legkaya industriya Publ., 1965. 337 p. (in Russian).