

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-3-221-232>
УДК 66.047.7



Оригинальная статья

А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев*

*Витебский государственный технологический университет,
Московский пр., 72, 210038, Витебск, Республика Беларусь*

**КОМПЛЕКСНЫЕ ОБОБЩЕННЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ КИНЕТИКИ СУШКИ
В ПРОЦЕССЕ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ВЛАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Аннотация. Изложены методы обработки экспериментальных данных, основанные на обобщенных устойчивых переменных кинетики сушки тонких плоских влажных материалов. В качестве комплексных переменных при обработке опытных данных в процессе конвективной сушки керамики, листового асбеста, войлока, картона были приняты: обобщенное время сушки, отношение времени сушки по периодам, отношение текущего влагосодержания к критическому, относительная скорость сушки. Обобщенные переменные в процессе сушки независимо от режима характеризуют наиболее общие закономерности кинетики сушки. Результаты обработки представлены в виде зависимости относительной скорости сушки от принятых переменных. Получены уравнения для расчета длительности сушки с минимальным числом постоянных, определяемых опытным путем. На основе уравнения теплового баланса для периода падающей скорости сушки даны уравнения для расчета температуры во втором периоде сушки. В результате обработки кривых скорости сушки керамики, асбеста, войлока получена зависимость относительной скорости сушки от относительного влагосодержания. Дано уравнение для определения плотности потока тепла во втором периоде скорости сушки и относительного влагосодержания. Представлена проверка достоверности полученных уравнений. Погрешность между расчетными и экспериментальными значениями находится в пределах точности обработки опытных данных до 10 %. Представленные приближенные методы расчета кинетики сушки, полученные обработкой опытных данных обобщенными комплексными переменными, представляют интерес для практики сушки капиллярно-пористых влажных материалов.

Ключевые слова: влагосодержание, скорость сушки, длительность сушки, критическое влагосодержание, температура материала, плотность потока тепла

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Ольшанский Анатолий Иосифович* – кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0009-0009-0000-6799>; *Голубев Алексей Николаевич* – старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения» Витебского государственного технологического университета, <https://orcid.org/0009-0004-5645-7912>, 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; *Голубев Алексей Николаевич* – работа с графическим материалом, редактирование текста рукописи, обсуждение результатов и выводов.

Для цитирования: Ольшанский, А. И. Комплексные обобщенные переменные кинетики сушки в процессе конвективной сушки влажных материалов / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2026. – Т. 71, № 3. – С. 221–232. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-3-221-232>

Поступила в редакцию: 28.11.2025

Доработанный вариант: 14.08.2026

Утверждена к публикации: 02.09.2026

Подписана в печать: 16.09.2026

Original article

Anatoly I. Ol'shanskii, Alexey N. Golubev*

Vitebsk State Technological University,
72, Moskovsky Ave., 210038, Vitebsk, Republic of Belarus**COMPLEX GENERALIZED VARIABLES OF DRYING KINETICS
IN THE PROCESS OF CONVECTIVE DRYING OF WET MATERIALS**

Abstract. The article presents experimental data processing methods based on generalized stable variables of the drying kinetics of thin, flat, wet materials. The following complex variables were adopted for processing experimental data during convective drying of ceramics, sheet asbestos, felt, and cardboard: generalized drying time, ratio of drying time by periods, ratio of current moisture content to critical moisture content, and relative drying rate. Generalized variables in the drying process, regardless of the drying mode, characterize the most general patterns of drying kinetics. The processing results are presented as a dependence of the relative drying rate on the adopted variables. Equations for drying duration with a minimum number of constants determined empirically are obtained. Based on the heat balance equation for the period of decreasing drying rate, equations for calculating the temperature in the second drying period are given. As a result of processing the drying rate curves for ceramics, asbestos, and felt, the dependence of the relative drying rate on the relative moisture content is obtained. An equation is presented for determining the heat flux density in the second period of drying rate and relative moisture content. A validation of the resulting equations is presented. The error between the calculated and experimental values is within the accuracy of the experimental data processing, up to 10 %. The presented approximate methods for calculating drying kinetics, obtained by processing experimental data with generalized complex variables, are of interest for the practical drying of capillary-porous wet materials.

Keywords: moisture content, drying rate, drying time, critical moisture content, material temperature, heat flux density

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

Information about the authors: *Anatoly I. Ol'shanskii* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, <https://orcid.org/0009-0009-0000-6799>; *Alexey N. Golubev* – Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering at Vitebsk State Technological University, <https://orcid.org/0009-0004-5645-7912>, 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; *Alexey N. Golubev* – work with graphic material, editing the text of the manuscript, discussion of results and conclusions.

For citation: Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. Complex generalized variables of drying kinetics in the process of convective drying of wet materials. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2026, vol. 71, no. 3, pp. 221–232 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-3-221-232>

Received: 28.11.2025

Modified: 14.08.2026

Approved for publication: 02.09.2026

Signed to the press: 16.09.2026

Введение. Сушка – сложный нестационарный процесс тепломассобмена, протекающий как в материале, так и на поверхности. Закономерности внутреннего и внешнего тепловлагопереноса оказываются в столь сложной форме зависимости от влагосодержания и температуры, что получение аналитических зависимостей для решения задач кинетики сушки сопряжено с большими математическими трудностями. Поэтому значительный интерес для практики сушки представляют приближенные, достаточно надежные и простые экспериментальные методы расчета кинетики сушки, основанные на наиболее общих закономерностях процесса.

Особенно эффективными являются такие методы расчета, которые основаны на обобщенных комплексных переменных, использование которых создает инвариантность при переходе от одних величин к другим, от одной системы координат к другой, что значительно сокращает число экспериментов.

Рассмотрим некоторые закономерности процесса сушки и приближенные методы расчета кинетики сушки ряда капиллярно-пористых влажных материалов, вытекающие из обработки опытных данных обобщенными комплексными переменными.

Обобщенные комплексные переменные. К обобщенными комплексным переменным следует отнести обобщенное время сушки ($N\tau$), относительную скорость сушки (N^*) и отношение времени сушки во втором (II) периоде ко времени сушки в первом (I) периоде (τ_{II}/τ_I). Обобщенная переменная $N\tau$ является устойчивым комплексом величин, характерным для кинетики сушки [1–5].

В развитии метода обобщения кривых сушки В. В. Красниковым на основе анализа многих экспериментальных данных по сушке различных материалов было установлено, что при определенном начальном влагосодержании ($\bar{u}_0$) для любого режима сушки сохраняется неизменной величина $N\tau = \text{const}$ [1–5]. Следовательно, использование $N\tau$ придает исследованию процесса сушки общий характер, поскольку анализируется не единичный режим сушки, а множество различных случаев сушки [1; 3–5]. Чем больше величина скорости сушки в I периоде (N), тем меньше длительность сушки (τ).

Одновременно с введением в кинетику сушки метода обобщения кривых сушки и комплекса $N\tau$ Г. К. Филоненко и А. В. Лыковым была введена важная для кинетики сушки переменная N^* – относительная скорость сушки [1; 3; 5; 6], определяемая по формуле

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

Величина относительной скорости при заданном влагосодержании находится из обобщенной кривой сушки, не зависит от ее режима и для конкретного материала при данном методе сушки является только функцией влагосодержания [1; 3; 4; 6].

Из метода обобщения кривых сушки следует, что относительная скорость сушки N^* является функцией влагосодержания $\bar{u}$ и обобщенных переменных $N\tau$, τ_{II}/τ_I , $\bar{u}/\bar{u}_{кр}$, следовательно, результаты обработки опытных данных можно представить в виде зависимостей [3; 6; 7; 8]:

$$N^* \approx \exp(-m \tau_{II} / \tau_I), \quad (1)$$

$$N^* \approx \exp(-a N \tau_{II}), \quad (2)$$

$$N^* \approx A \exp(\bar{u} / \bar{u}_{кр}), \quad (3)$$

$$N^* \approx (\bar{u} / \bar{u}_{кр})^n, \quad (4)$$

где $\bar{u}_{кр}$ – критическое влагосодержание; m , a , A , n – коэффициенты.

Все комплексные переменные связаны между собой скоростью сушки в периоде постоянной скорости N , которая в этом случае сама является комплексной переменной [3; 4; 7].

Совместное использование комплексных переменных создает условия для инвариантности переменных независимо от режима сушки и позволяет переходить от одних переменных к другим, от одной системы координат к другой, что сокращает количество проводимых экспериментов [3; 4; 7–9].

Эксперимент. Время сушки. На рис. 1, а представлены кривые сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ для сушки керамической пластины (кривая 1) и листового асбеста (кривая 2) в следующем режиме сушки: температура сушки $t_c = 120$ °С, скорость воздуха $v = 3$ м/с, относительная влажность воздуха $\phi = 5$ %. При «мягких» режимах (невысоких температурах и небольших скоростях воздуха) сушка протекает с периодами постоянной скорости сушки и постоянной температуры на уровне температуры мокрого термометра ($t_{м.т.}$), равной температуре на поверхности материала ($t_{п.}$). Прогрев тонких материалов проходит весьма быстро, их температура быстро увеличивается до $t_{м.т.}$ и остается постоянной до снижения влагосодержания до критического $\bar{u}_{кр}$. При влагосодержании $\bar{u} < \bar{u}_{кр}$ начинается период падающей скорости сушки (II период).

На рис. 2 и 3 даны результаты обработки опытных данных для зависимостей (1) и (2) в виде $\lg N^* = f(\tau_{II} / \tau_I)$, $\lg N^* = f(a N \tau_{II})$ для процессов сушки керамики (кривые 1), асбеста (кривые 2) и войлока (кривые 3). В данной системе координат образуются экспоненциальные кривые. Обработка эксперимента по сушке материалов проводилась в диапазоне следующих режимов сушки: температура процесса $t_c = 90$ – 120 °С, скорость воздуха $v = 3$; 5 и 10 м/с, относительная влажность воздуха $\phi = 5$ %. На рис. 4 показаны зависимости $m = f(\bar{u}_0 / \bar{u}_{кр})$ и $a = f(1 / \bar{u}_{кр})$.

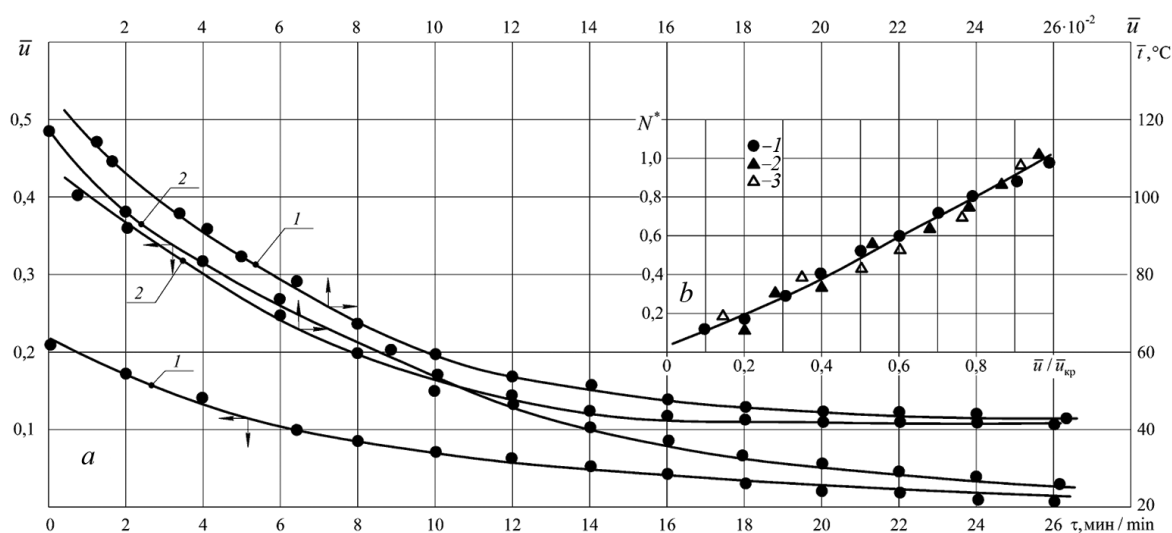


Рис. 1. Кривые сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ в процессе сушки керамики (кривая 1) и листового асбеста (кривая 2) для режима сушки: $t_c = 120^\circ\text{C}$, $v = 5\text{ м/с}$ (a); зависимость относительной скорости сушки $N^* = f(\bar{u} / \bar{u}_{kr})$ для сушки керамики (1), асбеста (2) и войлока (3) (b)

Fig. 1. Drying curves $\bar{u} = f(\tau)$ and temperature curves $\bar{t} = f(\bar{u})$ during the drying process of ceramics (curve 1) and sheet asbestos (curve 2) for the drying mode: $t_c = 120^\circ\text{C}$, $v = 5\text{ м/с}$ (a); dependence of the relative drying speed $N^* = f(\bar{u} / \bar{u}_{kr})$ for drying ceramics (1), asbestos (2) and felt (3) (b)

Для коэффициентов m и a в выражениях (1) и (2) обработкой экспериментальных данных по сушке различных материалов (1 – керамика, 2 – асбест, 3 – войлок, 4 – картон, 5 – фетр, 6 – натуральная кожа, 7 – пластины глины, 8 – макароны, 9 – пекарские дрожжи) были получены зависимости [6; 8; 10; 13]:

$$m \approx 0,5 \frac{\bar{u}_0}{\bar{u}_{kr}}, \quad (5)$$

$$a \approx \frac{0,8}{\bar{u}_{kr}}. \quad (6)$$

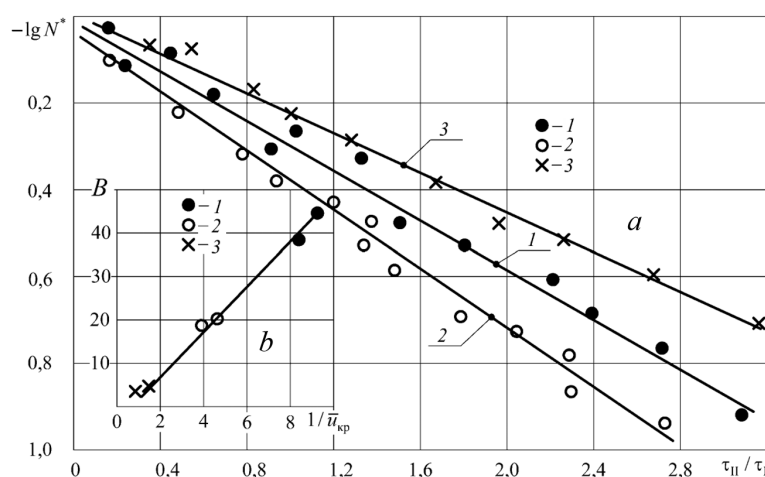


Рис. 2. Зависимость $\lg N^* = f(\tau_{II} / \tau_I)$ для сушки керамики (прямая 1), асбеста (прямая 2) и войлока (прямая 3) (a) и зависимость коэффициента $B = f(1 / \bar{u}_{kr})$ для сушки керамики (1), асбеста (2) и войлока (3) (b)

Fig. 2. Dependence $\lg N^* = f(\tau_{II} / \tau_I)$ for drying ceramics (straight line 1), asbestos (straight line 2) and felt (straight line 3) (a) and dependence of the coefficient $B = f(1 / \bar{u}_{kr})$ for drying ceramics (1), asbestos (2) and felt (3) (b)

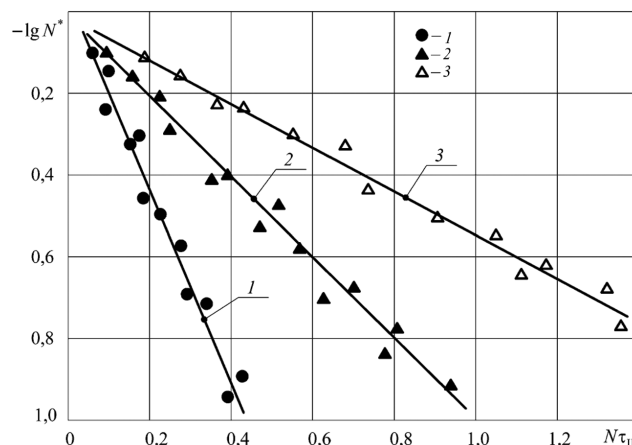


Рис. 3. Зависимость $\lg N^* = f(N^*\tau_{II})$ в процессе сушки керамики (прямая 1), асбеста (прямая 2) и войлока (прямая 3)
 Fig. 3. Dependence $\lg N^* = f(N^*\tau_{II})$ for drying ceramics (straight line 1), asbestos (straight line 2) and felt (straight line 3)

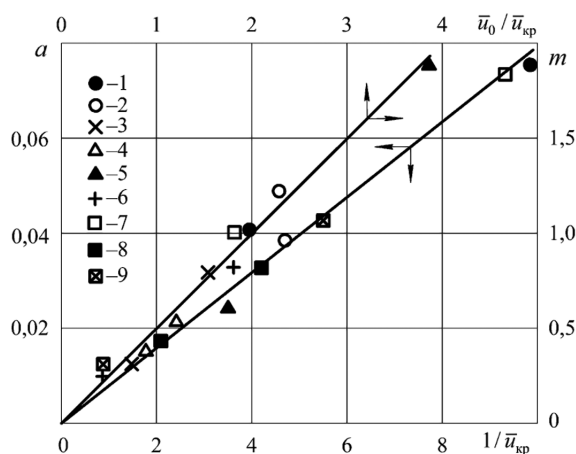


Рис. 4. Зависимость коэффициента m от отношения влагосодержаний $\bar{u}_0 / \bar{u}_{кр}$ и коэффициента a от влагосодержания $1 / \bar{u}_{кр}$ для процессов сушки влажных материалов: керамики (1), асбеста (2), войлока (3), картона (4), фетра (5), натуральной кожи (6), пластин глины (7), макарон (8), пекарских дрожжей (9)

Fig. 4. Dependence of the coefficient m on the ratio of moisture content $\bar{u}_0 / \bar{u}_{кр}$ and the coefficient a on moisture content $1 / \bar{u}_{кр}$ for the drying processes of wet materials: ceramics (1), asbestos (2), felt (3), cardboard (4), felt (5), natural leather (6), clay plates (7), pasta (8), baker's yeast (9)

Запишем уравнения (1)–(4) в следующем виде:

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} = N \exp\left(-m \frac{\tau_{II}}{\tau_I}\right), \quad (7)$$

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} = N \exp(-aN\tau), \quad (8)$$

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} = NA \exp(\bar{u} / \bar{u}_{кр}), \quad (9)$$

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} = \frac{1}{N} (\bar{u} / \bar{u}_{кр})^{1,3}. \quad (10)$$

Для процесса сушки керамики, асбеста и войлока (см. рис. 1, *b*) в уравнении (4) постоянная $n = 1,3$ [7; 8].

Эмпирические уравнения (7)–(10), полученные из обработки опытных данных, связывают относительную скорость сушки N^* с обобщенными комплексными переменными. Последова-

тельно выполняя интегрирование каждого из этих четырех уравнений, получим зависимости, позволяющие приближенно рассчитать длительность процесса сушки τ .

Интегрированием уравнения (7) в заданных пределах получим время сушки во II периоде [12; 13]

$$\tau_{II} = -\frac{\tau_I}{m} \ln \left[1 - \frac{\bar{u}_{кр} - \bar{u}}{N\tau_I} \right].$$

С учетом времени сушки в I периоде $\tau_I = (\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}) / N$ окончательно длительность процесса сушки можно представить выражением

$$\tau \approx \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}}{N} \left[1 - \frac{1}{m} \ln \left[1 - \left(\frac{\bar{u}_{кр} - \bar{u}}{\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}} \right) \right] m \right]. \quad (11)$$

Уравнение (8) представим в следующем виде:

$$\int_{\bar{u}_{кр}}^{\bar{u}} d\bar{u} = N \int_{\tau_{II}}^0 \exp(-aN\tau_{II}) d\tau.$$

Интегрируя данное уравнение, получим

$$\tau_{II} \approx -\frac{1}{aN} \ln [1 - a(\bar{u}_{кр} - \bar{u})].$$

Тогда длительность процесса сушки будет определяться выражением

$$\tau \approx \frac{1}{N} \left[(\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}) - \frac{1}{a} \ln (1 - a(\bar{u}_{кр} - \bar{u})) \right]. \quad (12)$$

Зависимость (9) можно представить в виде

$$- \int_{\bar{u}_{кр}}^0 \frac{d\bar{u}}{\exp(\bar{u} / \bar{u}_{кр})} = NA \int_{\tau_{II}}^0 d\tau.$$

Интегрируя это уравнение, находим

$$\tau_{II} = \frac{\bar{u}_{кр}}{NA} [1 - \exp(-\bar{u} / \bar{u}_{кр})]. \quad (13)$$

С учетом времени сушки в I периоде длительность сушки можно представить зависимостью

$$\tau \approx \frac{1}{N} \left[(\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}) + \frac{\bar{u}_{кр}}{A} [\ln(1 + \bar{u} / \bar{u}_{кр})] \right]. \quad (14)$$

Коэффициент A в выражении (14) является сложной функцией влагосодержания. На рис. 5 даны результаты обработки опытных данных для зависимости $A = f(\bar{u}_{кр} - \bar{u})$ в процессе сушки керамики (кривая 1), асбеста (кривая 2), войлока (кривая 3). В результате обработки опытных данных получена формула $A \approx \frac{1}{B(\bar{u}_{кр} - \bar{u})}$, где коэффициент B зависит от критическо-

го влагосодержания и может быть выражен зависимостью $B \approx f\left(\frac{1}{\bar{u}_{кр}}\right)$.

Обработкой опытных данных для сушки керамики, асбеста и войлока получена формула $B \approx \frac{4,4}{\bar{u}_{кр}} - 2$ (рис. 2, б).

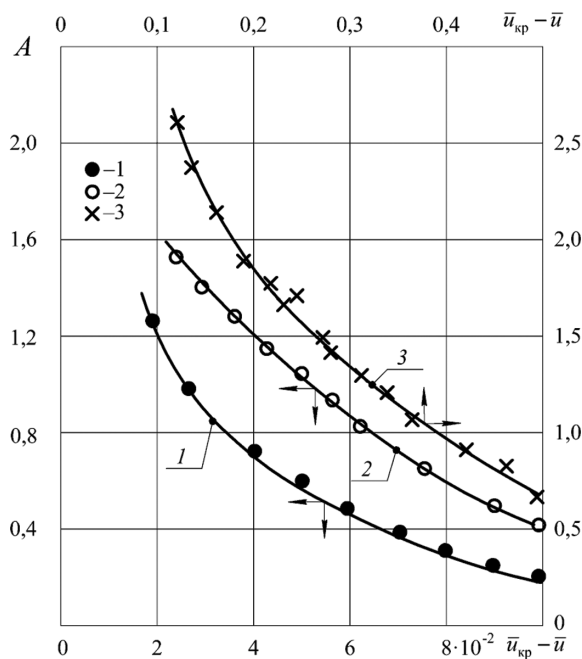


Рис. 5. Зависимость коэффициента A от влагосодержания $\bar{u}_{\text{кр}} - \bar{u}$ для сушки керамики (кривая 1), асбеста (кривая 2) и войлока (кривая 3)

Fig. 5. Dependence of the coefficient A on moisture content $\bar{u}_{\text{кр}} - \bar{u}$ for the drying processes of ceramics (curve 1), asbestos (curve 2), felt (curve 3)

Уравнение (10) представим в следующем виде:

$$\frac{1}{N} \frac{d\bar{u}}{(\bar{u} / \bar{u}_{\text{кр}})^{1,3}} \approx d\tau,$$

$$\frac{1}{N} \int_{\bar{u}}^{\bar{u}_{\text{кр}}} \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right)^{-1,3} d\bar{u} = \int_{\tau=0}^{\tau_{\text{II}}} d\tau.$$

Интегрируя данное уравнение, получим:

$$\tau_{\text{II}} \approx \frac{3,4}{N} \left[\frac{(\bar{u}_{\text{кр}})^{1,3}}{(\bar{u})^{0,3}} - \bar{u}_{\text{кр}} \right]. \quad (15)$$

С учетом времени сушки в I периоде ее длительность можно представить зависимостью

$$\tau \approx \frac{1}{N} \left[(\bar{u}_0 - \bar{u}_{\text{кр}}) + 3,4 \left(\frac{(\bar{u}_{\text{кр}})^{1,3}}{(\bar{u})^{0,3}} - \bar{u}_{\text{кр}} \right) \right]. \quad (16)$$

Полученные зависимости (11), (12), (14) и (16) позволяют приблизительно рассчитать длительность сушки.

Плотность потока тепла. Основное уравнение кинетики сушки А. В. Лыкова [1–4]

$$\frac{q_{\text{II}}}{q_{\text{I}}} = N^* (1 + \text{Rb}), \quad (17)$$

где q_{I} , q_{II} – плотности теплового потока в I и II периодах сушки. Число Ребиндера (Rb) характеризует отношение количества тепла, которое затрачивается на нагрев влажного тела, к количеству тепла, расходуемому на испарение влаги. При сушке тонкого влажного материала расход

тепла на нагревание значительно меньше расхода тепла на испарение из него влаги и $Rb \ll 1$. Расчеты показывают, что расход тепла на нагрев влажного тела от общего количества тепла, подводимого к нему, составляет 4–5 %. При этом максимальные значения числа Ребиндера ($Rb \approx 0,15–0,30$) наблюдаются к концу сушки при влагосодержаниях, близких к равновесным u_p . Величина Rb в конце сушки показывает необходимость прекращения процесса для избежания пересушивания материала и перерасхода энергии на сушку [1; 3; 4; 9]. Пренебрегая величиной Rb при малых его значениях, уравнение (17) запишем в виде

$$q_{II} = q_I N^*. \quad (18)$$

Плотность потока тепла в I периоде [1–4] можно определить по формуле

$$q_I = \rho r R_v N \text{ (Вт/м}^2\text{)},$$

где ρ – плотность, r – теплота парообразования, $R_v = V/F$ – отношение объема тела к поверхности.

Обработкой большого количества кривых скорости сушки керамики, асбеста, войлока, картона получены зависимости скорости сушки N^* от отношения влагосодержаний $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$ [7; 8; 13]:

$$N^* \approx 0,23 \exp\left(1,5 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right); \quad N^* \approx \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right)^{1,3}. \quad (19)$$

На рис. 1, б даны результаты обработки опытных данных по сушке керамики, асбеста и войлока для зависимости $N^* \approx f\left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right)$. Несовпадение в значениях N^* в формулах составляет 4 %.

Плотности потока тепла во II периоде вычисляются по формуле

$$q_{II} = q_I \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right)^{1,3} \text{ (Вт/м}^2\text{)}. \quad (20)$$

Температура материала. В случае нагревания тонкого плоского влажного тела, когда число Био (Bi) значительно меньше единицы ($Bi \ll 1$), а начальное распределение температуры внутри тела равномерное, теплообмен между поверхностью материала и внешней средой происходит по закону Ньютона [14–16]. Градиент температуры в середине тонкого плоского тела равен нулю, и для периода падающей скорости сушки (II период) можно записать уравнение теплового баланса [14; 15]

$$c_{вл} \rho R_v \frac{d\bar{t}}{d\tau} = \bar{\alpha}(t_c - \bar{t}), \quad (21)$$

где $c_{вл} = c_0 + c_{ж}\bar{u}$ – удельная теплоемкость влажного материала, c_0 – теплоемкость сухого материала, $c_{ж}$ – теплоемкость воды; $\bar{\alpha}$ – коэффициент теплоотдачи во II периоде; $\bar{t}$ – среднеинтегральная температура влажного материала; $d\bar{t} / d\tau$ – скорость нагрева материала.

Плотность потока тепла на испарение влаги найдем следующим образом:

$$\bar{\alpha}(t_c - \bar{t}_{II}) = j_{II} r = \rho R_v r \frac{d\bar{u}}{d\tau}. \quad (22)$$

Скорость сушки [2–4] определяется выражением

$$\frac{d\bar{u}}{d\tau} = N N^*. \quad (23)$$

Решая совместно уравнения (21) и (22), получим скорость нагрева материала:

$$\frac{d\bar{t}}{d\tau} = \frac{r}{c_{\text{вл}}} NN^*. \quad (24)$$

Подставляя N^* из выражений (1) и (2) в (24), получим уравнения температурной кривой [12]:

$$\frac{d\bar{t}}{d\tau} \approx \frac{r}{c_{\text{вл}}} N \exp\left(-m \frac{\tau_{\text{II}}}{\tau_{\text{I}}}\right), \quad (25)$$

$$\frac{d\bar{t}}{d\tau} \approx \frac{r}{c_{\text{вл}}} N \exp(-aN\tau_{\text{II}}). \quad (26)$$

Зависимости устанавливают связь между теплообменом и температурой материала во II периоде. Интегрируя уравнения (25) и (26) в пределах от $\bar{t}$ в I периоде до температуры среды t_c , получим уравнения температурных кривых [12]:

$$\bar{t} \approx t_c - \frac{r\Psi}{c_{\text{вл}}m} \left[(\bar{u}_0 - \bar{u}_{\text{кр}}) \exp\left(-m \frac{\tau_{\text{II}}}{\tau_{\text{I}}}\right) \right], \quad (27)$$

$$\bar{t} \approx t_c - \frac{\beta r}{c_{\text{вл}}a} \exp(-aN\tau_{\text{II}}). \quad (28)$$

Коэффициенты Ψ и β в выражениях (27) и (28) определяются по формулам: $\Psi \approx C \exp(n(\bar{u}_{\text{кр}} - \bar{u}))$, $\beta \approx C_1 \exp(-n_1(\bar{u}_{\text{кр}} - \bar{u}))$. Значения коэффициентов C , C_1 , n , n_1 для процессов сушки керамики, асбеста и войлока даны в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Значения коэффициентов в расчетных формулах
 Table 1. Values of coefficients in calculation formulas

Наименование материала Name of material	m	a	C	$C_1 \cdot 10^3$	n	n_1
Керамика Ceramics	0,98	8	0,4	4,0	9	16
Асбест Asbestos	1,15	4	0,3	2,3	2	6
Войлок Felt	0,77	1,08	0,18	0,18	1,5	3

Обработкой экспериментальных данных ряда различных материалов (см. рис. 2) получено выражение для относительной температуры [13; 17]

$$T \approx \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{\text{м.т}}} \approx (N^*)^{0,43}. \quad (29)$$

Подставляя (19) в (29), получим

$$\frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{\text{м.т}}} \approx \left[\left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right)^{1,3} \right]^{0,43} \approx \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right)^{0,56}. \quad (30)$$

Среднеинтегральная температура определяется уравнением

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{\text{м.т}}) \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right)^{0,56}. \quad (31)$$

В табл. 2 дано сопоставление расчетных значений длительности сушки и среднеинтегральных температур, вычисленных по формулам, с экспериментальными значениями. Погрешность находится в пределах ошибки эксперимента.

Т а б л и ц а 2. Расчетные значения времени сушки и температуры, вычисленные по формулам, и сопоставление расчетных значений с экспериментом в процессах сушки керамики, асбеста и войлока

Table 2. Values of drying time and temperature calculated using formulas, and comparison of calculated values with experiment in the drying processes of ceramics, asbestos and felt

$\bar{u}$	$\bar{u} / \bar{u}_{кр}$	τ , мин/мин экс./exp.	τ , мин/мин (11)	τ , мин/мин (12)	τ , мин/мин (14)	τ , мин/мин (16)	$\bar{t}$, °C экс./exp.	$\bar{t}$, °C (27)	$\bar{t}$, °C (28)	$\bar{t}$, °C (31)	N^* (19)
Листовой асбест: размеры образца $180 \times 100 \times 6$ мм; $\rho = 770$ кг/м ³ ; режим сушки: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %; $\bar{u}_0 = 0,46$; $\bar{u}_{кр} \approx 0,2$; $N = 0,03$ мин ⁻¹ ; $\tau_1 = 8$ мин; $t_{м.т} = 42$ °C Sheet asbestos: sample dimensions $180 \times 100 \times 6$ mm; $\rho = 770$ kg/m ³ ; drying mode: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ m/s; $\varphi = 5$ %; $\bar{u}_0 = 0,46$; $\bar{u}_{кр} \approx 0,2$; $N = 0,03$ мин ⁻¹ ; $\tau_1 = 8$ min; $t_{м.т} = 42$ °C											
0,16	0,8	9,0	8,5	9,3	9,8	9,7	52	53	57	51	0,75
0,14	0,7	11,0	9,8	11,7	10,4	10,4	54	55	54	56	0,64
0,12	0,6	13,5	12,7	13,2	12,6	13,2	62	59	60	61	0,52
0,08	0,4	16,0	16,7	15,4	15,4	15,7	74	72	72	74	0,32
0,04	0,2	21,0	20,4	20,7	19,7	22,3	84	83	85	86	0,13
0,02	0,1	26,5	24,5	26,2	25,2	28,3	92	94	95	97	0,07
Керамическая плитка: размеры образца $120 \times 80 \times 5$ мм; $\rho = 1860$ кг/м ³ ; режим сушки: $t_c = 120$ °C; $v = 3$ м/с; $\varphi = 5$ %; $\bar{u}_0 = 0,2$; $\bar{u}_{кр} \approx 0,1$; $N = 0,0155$ мин ⁻¹ ; $\tau_1 = 6,5$ мин; $t_{м.т} = 49$ °C Ceramic tiles: sample dimensions $120 \times 80 \times 5$ mm; $\rho = 1860$ kg/m ³ ; drying mode: $t_c = 120$ °C; $v = 3$ m/s; $\varphi = 5$ %; $\bar{u}_0 = 0,2$; $\bar{u}_{кр} \approx 0,1$; $N = 0,0155$ мин ⁻¹ ; $\tau_1 = 6,5$ min; $t_{м.т} = 49$ °C											
0,08	0,8	10,5	10,8	10,7	11,2	11,2	62	64	62	64	0,75
0,06	0,6	14,0	14,4	14,6	13,6	13,2	74	73	74	71	0,52
0,04	0,4	18,5	19,3	18,8	17,8	17,9	83	81	85	82	0,32
0,02	0,2	27,0	27,6	28,6	25,7	26,8	92	93	94	96	0,12
Шерстяной войлок: размеры образца $180 \times 120 \times 10$ мм; $\rho = 180$ кг/м ³ ; режим сушки: $t_c = 120$ °C; $v = 3$ м/с; $\varphi = 5$ %; $\bar{u}_0 = 1,14$; $\bar{u}_{кр} \approx 0,74$; $N = 0,052$ мин ⁻¹ ; $\tau_1 = 7,5$ мин; $t_{м.т} = 42$ °C Wool felt: sample dimensions $180 \times 120 \times 10$ mm; $\rho = 180$ kg/m ³ ; drying mode: $t_c = 120$ °C; $v = 3$ m/s; $\varphi = 5$ %; $\bar{u}_0 = 1,14$; $\bar{u}_{кр} \approx 0,74$; $N = 0,052$ мин ⁻¹ ; $\tau_1 = 7,5$ min; $t_{м.т} = 42$ °C											
0,75	1,0	7,5	—	—	—	—	42	43	43	43	1,0
0,7	0,93	9,5	9,2	10,0	9,8	9,9	43	42	42	44	0,89
0,6	0,80	12,0	11,6	11,8	11,4	12,6	46	44	44	47	0,75
0,5	0,67	15,5	14,7	14,8	14,6	15,3	48	47	46	52	0,59
0,4	0,53	17,5	16,8	16,7	16,8	18,2	53	52	53	54	0,44
0,3	0,40	21,5	19,4	21,3	21,2	22,4	58	57	57	62	0,32
0,2	0,27	28,0	26,7	27,2	26,8	31,3	69	68	69	71	0,18

Выводы

1. На основе относительной скорости сушки и обобщенных комплексных переменных выведены приближенные уравнения для расчета длительности сушки.

2. Используя уравнения кинетики сушки и уравнения теплового баланса для II периода получены уравнения для определения относительной скорости сушки и расчета температуры в этом периоде.

3. Дано сравнение расчетных значений времени сушки и температуры с экспериментом. Погрешность в значениях составляет допустимые 10 %.

Представленные приближенные методы расчета длительности, относительной скорости и температуры сушки, полученные обработкой опытных данных обобщенными комплексными переменными, представляют интерес для практики сушки капиллярно-пористых влажных материалов.

Список использованных источников

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. – Мн.: Бел. наука, 2010. – 443 с.
3. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. – М.: Энергия, 1973. – 288 с.
4. Сажин, Б. С. Научные основы техники сушки / Б. С. Сажин. – М.: Наука, 1997. – 447 с.
5. Олышанский, А. И. Регулярный тепловой режим и влияние критериев подобия тепло-массообмена на процесс конвективной сушки пористой керамики / А. И. Олышанский // Инженерно-физический журнал. – 2016. – Т. 89, № 1. – С. 37–48.
6. Филоненко, Г. К. Сушильные установки / Г. К. Филоненко, П. Д. Лебедев. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1952. – 263 с.
7. Олышанский, А. И. Исследование сушки тонких материалов с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Олышанский // Инженерно-физический журнал. – 2016. – Т. 89, № 4. – С. 884–894.
8. Олышанский, А. И. Экспериментальное исследование кинетики сушки тонких плоских влажных материалов методом регулярного режима с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Олышанский, А. М. Гусаров // Инженерно-физический журнал. – 2017. – Т. 90, № 3. – С. 700–713.
9. Рудобашта, С. П. Теплотехника / С. П. Рудобашта. – М.: Перо, 2015. – 672 с.
10. Гинзбург, А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / А. С. Гинзбург. – М.: Пищ. пром-сть, 1973. – 528 с.
11. Бочарова, Г. А. Исследование процесса сушки пекарских дрожжей комбинированным методом: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Галина Алексеевна Бочарова. – Воронеж, 1972. – 33 с.
12. Олышанский А. И. Некоторые закономерности кинетики влаготеплообмена при сушке влажных материалов / А. И. Олышанский, Е. Ф. Макаренко, В. И. Олышанский // Инженерно-физический журнал. – 2008. – Т. 81, № 6. – С. 1102–1110.
13. Куц, П. С. Некоторые закономерности тепловлагообмена и приближенные методы расчета кинематики процесса сушки влажных материалов / П. С. Куц, А. И. Олышанский // Инженерно-физический журнал. – 1977. – Т. 32, № 5. – С. 1007–1014.
14. Лыков, А. В. Теоретические основы строительной теплофизики / А. В. Лыков. – Мн.: Изд-во Акад. наук БССР, 1961. – 519 с.
15. Васильев, В. Н. Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса / В. Н. Васильев, В. Е. Куцакова, С. В. Фролов. – СПб.: ГИОРД, 2013. – 224 с.
16. Рабинович, Г. Д. Новый метод расчета конвективной сушки тонких материалов / Г. Д. Рабинович // Инженерно-физический журнал. – 1966. – Т. 11, № 2. – С. 182–192.
17. 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.

References

1. Lykov A. V. *Theory of Drying*. Moscow, Energiya Publ., 1968. 472 p. (in Russian).
2. Akulich P. V. *Calculations of Drying and Heat Exchange Installations*. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2010. 443 p. (in Russian).
3. Krasnikov V. V. *Conductive Drying*. Moscow, Energiya Publ., 1973. 288 p. (in Russian).
4. Sazhin B. S. *Scientific Fundamentals of Drying Techniques*. Moscow, Nauka Publ., 1997. 447 p. (in Russian).
5. Ol'shanski, A. I. 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*, 2016, vol. 89, no. 1, pp. 38–49. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1351-6>
6. Filonenko G. K., Lebedev P. D. *Dryers*. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1952. 263 p. (in Russian).
7. Ol'shanskii A. I. Investigation of the drying of thin materials with the use of generalized complex variables. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, vol. 89, no. 1, pp. 886–895. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1450-4>
8. Ol'shanskii A. I., Gusarov A. M. 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*, 2017, vol. 90, no. 3, pp. 665–678. <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1614-x>
9. Rudobashta S. P. *Thermal Engineering*. Moscow, Pero Publ., 2015. 672 p. (in Russian).
10. Ginzburg A. S. *Fundamentals of the Theory and Technology of Drying Food Products*. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1973. 528 p. (in Russian).

11. Bocharova G. A *Study of the Drying Process of Baker's Yeast Using a Combined Method*. Abstract of a PhD thesis Cand. Sci. (Eng.). Voronezh., 1972. 33 p. (in Russian).
12. Ol'shanskii A. I., Makarenko E. F., Ol'shanskii V. I. Certain regularities of the kinetics of moisture and heat exchange in drying of moist materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2008, vol. 81, no. 6, pp. 1144–1152. <https://doi.org/10.1007/s10891-009-0131-y>
13. Kutz P. S., Ol'shanskii A. I. Some features of heat and moisture transfer and approximate methods of calculating the drying kinetics of moist materials. *Journal of Engineering Physics* 1977, vol. 32, no. 6, pp. 650–656. <https://doi.org/10.1007/bf00862568>
14. Lykov A. V. *Theoretical Foundations of Construction Thermophysics*. Minsk, BSSR Academy of Sciences Publ., 1961. 519 p. (in Russian)
15. Vasiliev V. N., Kutsakova V. E., Frolov S. V. *Drying Technology. Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. St. Petersburg, Giord Publ., 2013. 224 p. (in Russian)
16. Rabinovich G. D. A New method of calculation of convective drying of thin materials. *Journal of Engineering Physics*, 1966, vol. 11, no. 2, pp. 98–104. <https://doi.org/10.1007/BF00831262>
17. Lykov A. V., Kuts P. S., Olshanskii A. I. Kinetics of Heat Transfer in the Process of Drying Wet Materials. *Journal of Engineering Physics*, 1972, vol. 23, no. 3, pp. 1082–1086. <https://doi.org/10.1007/bf00832214>