
ЭНЕРГЕТИКА

POWER ENGINEERING

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-6-496-503>

УДК 66.047.7

Уравнение кривой сушки и продолжительность сушки влажных материалов

Кандидаты техн. наук, доценты А. И. Ольшанский¹⁾, С. В. Жерносек¹⁾, А. М. Гусаров¹

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

Реферат. Изложены зональные методы расчета длительности сушки, основанные на графическом дифференцировании кривой сушки. Дан анализ расчета времени сушки по кривой ее скорости по методам А. В. Лыкова, В. В. Красникова, С. М. Смирнова, Б. С. Сажина, П. С. Куца. Рассмотрены методы расчета длительности сушки на основе ее относительной скорости без использования кривой скорости сушки. На основе метода обобщенных кривых сушки Г. К. Филоненко и В. В. Красникова дана обобщенная безразмерная кривая сушки как функция ее обобщенного времени. Рассмотрены возможные способы выражения уравнения обобщенной кривой сушки гиперболической, степенной и экспоненциальной зависимостями. Определены необходимые условия для выяснения пригодности этих зависимостей для описания уравнений кривых сушки и вывода уравнений. Получены уравнения кривой сушки по этим зависимостям и формулы для расчета времени сушки керамики, асбеста и войлока. На основе зависимости комплексной переменной относительной скорости сушки от отношения влагосодержаний, текущего к начальному, для процессов сушки керамики, асбеста, войлока даны уравнения для вычисления времени сушки. Рассмотрены способы выражения кривой сушки в виде зависимостей относительных влагосодержаний от обобщенного времени сушки. Представлены методы расчета длительности сушки на основе относительной скорости сушки. На основе зависимости относительной скорости сушки от безразмерного влагосодержания даны приближенные методы определения критического влагосодержания материала. Выполнены проверка достоверности полученных уравнений и сравнение расчетных значений с экспериментом. Погрешность вычислений находится в области точности проведения эксперимента.

Ключевые слова: влагосодержание, скорость сушки, обобщенное время сушки, режимы сушки

Для цитирования: Ольшанский, А. И. Уравнение кривой сушки и продолжительность сушки влажных материалов / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // Наука и техника. 2025. Т. 24, № 6. С. 496–503. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-6-496-503>

Drying Curve Equation and Drying Time of Wet Materials

A. I. Ol'shanskii¹⁾, S. V. Zhernosek¹⁾, A. M. Gusarov¹⁾

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

Abstract. Zonal methods for calculating drying time, based on graphical differentiation of the drying curve, are presented. An analysis of drying time calculation based on the drying rate curve is given using the methods of A. V. Lykov, V. V. Krasnikov, S. M. Smirnov, B. S. Sazhin, and P. S. Kuts. The methods for calculating the drying time based on the relative drying rate without using the drying rate curve are considered. A generalized dimensionless drying curve as a function of the generalized drying time is given based on the method of generalized drying curves of G. K. Filonenko and V. V. Krasnikov. Possible

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

methods for approximating the equation of a generalized drying curve by hyperbolic, power, and exponential dependencies are considered. The necessary conditions are given for determining the suitability of these dependencies for describing the equations of the drying curves and deriving the equations. Equations of the drying curve are obtained from these dependencies and formulas are given for calculating the drying time for the processes of drying ceramics, asbestos, and felt. Based on the dependence of the complex variable of the relative drying rate on the ratio of the current to the initial moisture content, for the processes of drying ceramics, asbestos, and felt, equations are given for calculating the drying time. The methods for expressing the drying curve in the form of dependencies of relative moisture content on the generalized drying time are considered. Methods for calculating the drying time based on the relative drying rate are presented. Based on the dependence of the relative drying rate on the dimensionless moisture content, approximate methods for determining the critical moisture content of the material are given. The reliability of the obtained equations is checked and the calculated values are compared with the experiment. The calculation error is within the range of experimental accuracy.

Keywords: moisture content, drying rate, generalized drying time, drying modes

For citation: Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V., Gusarov A. M. (2025) Drying Curve Equation and Drying Time of Wet Materials. *Science and Technique*. 24 (6), 496–503. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-6-496-503> (in Russian)

Введение

Длительность сушки материалов – важнейший показатель кинетики сушки, определяющий не только технологические качества готового продукта, но и конструкцию, размеры сушильной камеры, способ подвода энергоносителя, выбор режима сушки [1–4].

Продолжительность процесса сушки можно рассчитать решением системы дифференциальных уравнений массопереноса [1–5]. Для этого необходимо знать сложную зависимость коэффициентов тепловлагопереноса от влагосодержания, температуры, режима сушки и способа подвода энергоносителя [1–5]. Трудность получения точного математического решения вызывает необходимость проведения экспериментальных исследований с разработкой приближенных простых уравнений для расчета длительности сушки [1–7]. А. В. Лыковым [1–4] предложен метод расчета длительности сушки с построением кривой скорости сушки и заменой сложной кривой спрямляющей прямой, что создает пропорциональную зависимость между скоростью сушки и удаляемой влагой. Уравнение кривой скорости сушки получают методом графического дифференцирования кривой сушки [1–7]. Такие методы называются зональными [1–5]. Уравнение кривой сушки по однозональному методу А. В. Лыкова имеет вид [1]

$$\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{kp} - u_p} = \exp(-K \tau_{II}), \bar{u} < \bar{u}_{kp},$$

где \bar{u} , \bar{u}_{kp} , u_p – текущее, критическое и равновесное влагосодержание материала; K – коэф-

фициент сушки; τ_{II} – продолжительность второго периода сушки.

К зональным относятся методы Г. К. Филоненко, А. В. Лыкова, В. В. Красникова, С. М. Смирнова, П. А. Жучкова [1–9]. Применились также и другие методы расчета времени сушки, основанные на ее относительной скорости N^* [6, 10, 11]. П. С. Куцем с сотрудниками экспериментальные данные по сушке многих материалов обобщались обработкой опытных данных зависимостями вида [6, 10]:

$$N^* = \frac{1}{N} \frac{d\bar{u}}{d\tau} = \exp\left(-m \frac{\tau_{II}}{\tau_I}\right);$$

$$N^* = \exp(-aN\tau),$$

где N – скорость сушки в первом периоде; τ_{II}/τ_I – отношение времени сушки по периодам; $N\tau$ – обобщенное время сушки; m, a – постоянные, определяемые опытным путем.

При расчетах длительности сушки по этим уравнениям не используется кривая скорости сушки, а коэффициенты m и a являются линейными функциями отношения \bar{u}/\bar{u}_{kp} [6, 10, 11].

Относительная скорость N^* не зависит от режима сушки и для конкретного материала является только функцией влагосодержания [1–3]. Это является следствием, вытекающим из метода обобщения кривых сушки Г. К. Филоненко [8]. В. В. Красников [3] в продолжении разработки метода обобщения кривых сушки Г. К. Филоненко в результате анализа экспериментальных данных по сушке различных материалов установил, что произведе-

ние $N\tau$ при данном влагосодержании не зависит от режима сушки [1–4]. На этом основании можно построить обобщенную кривую сушки в безразмерных координатах $\bar{u} / \bar{u}_0 = f(N\tau)$, где $N\tau$ – обобщенная комплексная переменная (обобщенное время сушки), не зависящая от ее режима; \bar{u}_0 – начальное влагосодержание материала. Б. С. Сажиным разработан метод расчета длительности сушки без необходимости построения кривой ее скорости [2, 4]. В основу метода положено обобщенное уравнение масопередачи [2, 4]. Уравнение Б. С. Сажина описывает весь процесс сушки, включая ее оба периода. Метод Б. С. Сажина отличается от зональных методов расчета более простой обработкой эксперимента.

В [11–14] даны результаты расчетов времени сушки по зональным методам А. В. Лыкова, В. В. Красникова, С. М. Смирнова, П. С. Куца, а также метода Б. С. Сажина.

Уравнения кривой сушки

В теории и практике принято считать, что кривая сушки представляет собой две экспоненты, сопряженные в точке второго критического влагосодержания [1–6]. Всего по классификации А. В. Лыкова при сушке самых разных материалов наблюдаются шесть типов кривых ее скорости [1–4]. При сушке влажных капиллярно-пористых материалов наблюдаются кривые скорости сушки третьего типа, обращенные выпуклостью к оси влагосодержаний. При сушке керамики, войлока, асбеста, глины наблюдаются такие кривые скорости сушки [1–7].

На рис. 1а даны обобщенные кривые сушки в координатах $\bar{u} / \bar{u}_0 = f(N\tau)$. Кривые получены обработкой эксперимента по сушке керамики, асбеста и войлока для режимов: $t_c = 90$ и 120°C ; скорость воздуха 5 m/s .

Рассмотрим следующие зависимости для вывода уравнения кривой сушки:

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_0} = \frac{1}{A(N\tau) + b}; \quad (1)$$

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_0} = \Phi(N\tau)^{n_0}; \quad (2)$$

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_0} = \exp(-\beta N\tau); \quad (3)$$

$$\lg \frac{\bar{u}}{\bar{u}_0} = -a_0(N\tau), \quad (4)$$

где A , Φ , n_0 , β , a_0 – постоянные, определяемые экспериментальным способом.

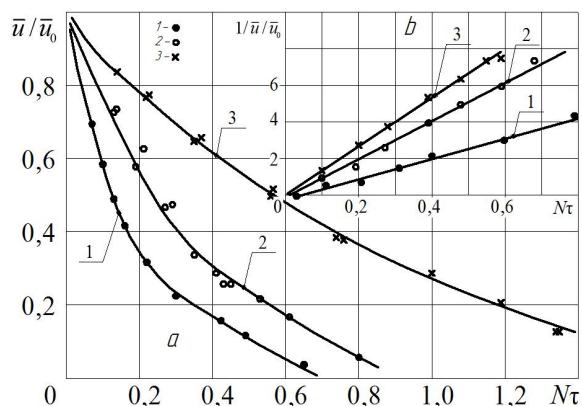


Рис. 1. Обобщенная безразмерная кривая сушки $\bar{u} / \bar{u}_0 = f(N\tau)$ (а) и зависимость $1 / \bar{u} / \bar{u}_0 = f(N\tau)$ (б) для процессов сушки керамической пластины (1), пластины асбеста (2) и войлока (3). Режимы сушки: $t_c = 90$ и 120°C ; $v = 5 \text{ m/s}$

Fig. 1. Generalized dimensionless drying curve $\bar{u} / \bar{u}_0 = f(N\tau)$ (a) and dependence $1 / \bar{u} / \bar{u}_0 = f(N\tau)$ (b) for drying processes of ceramic plate (1), asbestos plate (2) and felt (3). Drying modes $t_c = 90$ and 120°C ; $v = 5 \text{ m/s}$

Уравнение (1) представляет ветвь гиперболы, асимптотически приближающуюся к оси $0 - N\tau$ [15], (2) – степенную зависимость, которая предполагаемо может аппроксимировать обобщенную кривую сушки [15]. Уравнение (3) описывает кривую сушки экспоненциальной зависимостью, а (4) – простая логарифмическая зависимость [15].

При построении эмпирической формулы необходимо выяснить общий вид этой формулы и составить таблицу для переменных с определением наилучших ее параметров. Выполним необходимые условия для выяснения пригодности этой формулы для описания конкретной экспериментальной кривой, представленной наиболее точными исходными табличными данными [15].

Обработка опытных данных

Для выбора формулы (1) в качестве уравнения обобщенной кривой сушки необходимо вы-

полнить основное условие. В системе координат $1/\bar{u}/\bar{u}_0 = f(N\tau)$ все опытные точки должны находиться на одной прямой [15]. На рис. 1б дана такая зависимость для процессов сушки керамики, асбеста и войлока. Все экспериментальные точки удовлетворительно укладываются на прямые. Коэффициент b в формуле (1) равен нулю. Для выбора степенной (2) и экспоненциальной (3) зависимостей в качестве уравнений кривой сушки необходимо, чтобы точки в координатах $\lg(\bar{u}/\bar{u}_0) - \lg(N\tau)$ (рис. 2) для степенной зависимости и все точки в системе координат $\ln(\bar{u}/\bar{u}_0) - f(N\tau)$ (рис. 3б) для экспоненциальных укладывались на прямые [15].

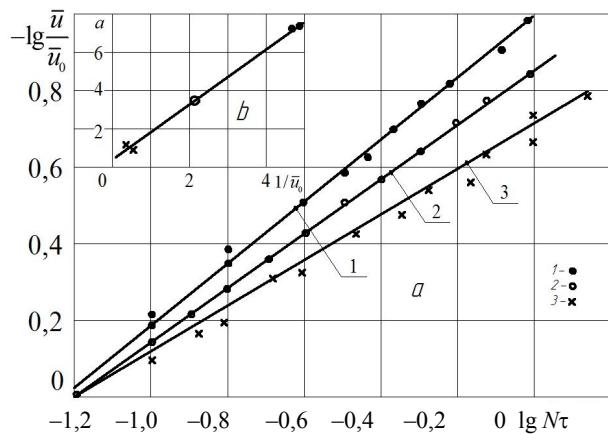


Рис. 2. Зависимости $\lg \bar{u} / \bar{u}_0$ от $\lg N\tau$ для сушки керамики (1), асбеста (2) и войлока (3) (а) и зависимость коэффициента $a = f(1 / \bar{u}_0)$ (б). Режимы сушки: $t_c = 90$ и 120°C ; $v = 5 \text{ м/с}$

Fig. 2. Dependencies $\lg \bar{u} / \bar{u}_0$ on $\lg N\tau$ for drying ceramics (1), asbestos (2) and felt (3) (a) and dependence of the coefficient $a = f(1 / \bar{u}_0)$ (b). Drying modes $t_c = 90$ and 120°C ; $v = 5 \text{ m/s}$

На рис. 2 и рис. 3б даны эти зависимости для сушки керамики, асбеста и войлока. Запишем уравнения (1)–(4) в виде:

$$\tau \approx \frac{1}{AN} \left(\frac{\bar{u}_0}{\bar{u}} \right); \quad (5)$$

$$\tau \approx \frac{1}{N} \left(\frac{1}{\Phi} \cdot \frac{\bar{u}}{\bar{u}_0} \right)^n, \text{ где } n = \frac{1}{n_0}; \quad (6)$$

$$\tau = -\frac{1}{\beta N} \ln (\bar{u} / \bar{u}_0); \quad (7)$$

$$\tau \approx \frac{a_0}{N} \lg \frac{\bar{u}_0}{\bar{u}}. \quad (8)$$

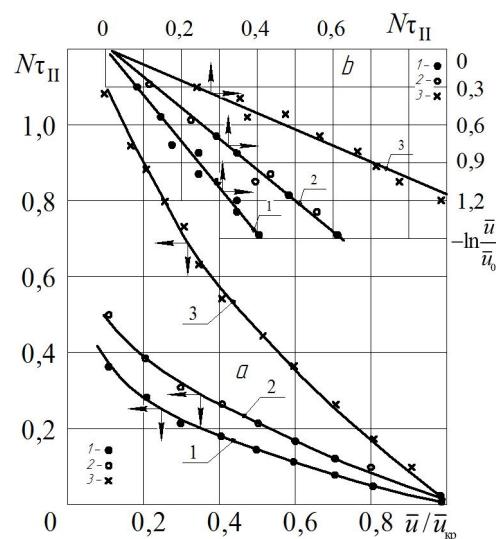


Рис. 3. Зависимость обобщенного времени сушки $N\tau_{II}$ от относительного влагосодержания \bar{u} / \bar{u}_{kp} (а) и зависимость $\ln \bar{u} / \bar{u}_0$ от обобщенного времени сушки $N\tau_{II}$ (б) в процессах сушки керамики (1), асбеста (2) и войлока (3). Режимы сушки: $t_c = 90$ и 120°C ; $v = 5 \text{ м/с}$

Fig. 3. Dependence of the generalized drying time $N\tau_{II}$ on the relative moisture content \bar{u} / \bar{u}_{kp} (a) and dependence $\ln \bar{u} / \bar{u}_0$ on the generalized drying time $N\tau_{II}$ (b) in the drying processes of ceramics (1), asbestos (2) and felt (3). Drying modes $t_c = 90$ and 120°C ; $v = 5 \text{ m/s}$

Значения коэффициентов, полученных обработкой эксперимента, даны в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов в расчетных формулах (5)–(10)
Values of coefficients in calculation formulas (5)–(10)

Материал	A	Φ	β	ψ	n_0	a_0	m_0	m
Керамика	20,05	0,04	6,25	4,3	0,84	0,155	1,8	0,50
Асбест	9,2	0,082	3,25	3,5	0,72	0,32	2,2	0,47
Войлок	4,2	0,30	0,95	1,2	0,90	0,83	1,6	0,62

На рис. 3 дана зависимость $N\tau_{II} = f(\bar{u} / \bar{u}_{kp})$ для процессов сушки керамики (1), асбеста (2) и войлока (3). Представленные кривые являются экспонентами. Обработкой опытных данных экспоненциальных кривых методом наименьших квадратов получено приближенное уравнение

$$N\tau_{II} \approx \exp(-\psi \bar{u} / \bar{u}_{kp}). \quad (9)$$

Длительность сушки во втором периоде

$$\tau_{II} = \frac{1}{N} \exp(-\psi \bar{u} / \bar{u}_{kp}). \quad (10)$$

При значении $\bar{u} / \bar{u}_{kp} = 1$ время сушки $\tau_{II} \rightarrow 0$, и отсчет времени сушки для второго периода ведется от $\tau_{II} = 0$.

Критическое влагосодержание материала

Рассматривая методы расчета длительности сушки по разным приближенным уравнениям, А. В. Лыков отмечает, что в уравнения входит критическое влагосодержание \bar{u}_{kp} . Отмечается, что при разработке приближенных методов расчета времени сушки необходимо, чтобы формулы содержали минимальное число постоянных, определяемых опытным путем [12, 13, 15]. Уравнение А. В. Лыкова для однозонального метода расчета конвективной сушки [15]

$$\tau \approx \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}}{N} - \frac{\bar{u}_0}{m_0 N} \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{kp} - u_p}.$$

Критическое влагосодержание материала \bar{u}_{kp} А. В. Лыков предложил определять приближенным соотношением [15, 17]

$$\bar{u}_{kp} \approx \frac{\bar{u}_0}{m_0}. \quad (11)$$

При исследовании сушки керамики, асбеста, войлока из графика зависимости $N^* = f(\bar{u} / \bar{u}_0)$ следовало, что продолжение прямых, полученных обработкой эксперимента, до пересечения с вертикалью при $\bar{u} / \bar{u}_0 = 1$ отсекает по оси ординат отрезки, численно равные: $m_0 = 1,6$ – для войлока, $m_0 = 1,8$ – для керамики, $m_0 = 2,2$ – для асбеста, а по оси аб-

цисс образуются отрезки, равные $\bar{u}_{kp} = m \bar{u}_0$, где коэффициент m принимает значения: $m = 0,47$ – для асбеста, $m = 0,5$ – для керамики, $m = 0,62$ – для войлока.

Из анализа результатов обработки опытных данных для зависимости $N^* = f(\bar{u} / \bar{u}_0)$ получена зависимость, совпадающая с формулой (11). Н. С. Михеевой при конвективной сушке различных влажных капиллярно-пористых материалов использовалась эта формула при расчетах длительности сушки и принималась величина коэффициентов $m_0 = 1,8$ [17].

Критическое влагосодержание из графика $N^* = f(\bar{u} / \bar{u}_0)$ определяется зависимостью

$$\bar{u}_{kp} \approx m \bar{u}_0. \quad (12)$$

На рис. 4 даны зависимости для коэффициентов $m_0 = f(\bar{u}_0)$ и $m = f(\bar{u}_0)$.

Приближенно зависимости аппроксимируются линейными уравнениями:

$$m_0 \approx 2,1 - 0,45 \bar{u}_0; \quad m \approx 0,15 \bar{u}_0 + 0,44.$$

Из метода обобщения кривых сушки Г. К. Филоненко [8] вытекает, что ее обобщенное время $N\tau_{II}$ и относительная скорость N^* есть функция влагосодержания \bar{u} , и, следовательно, $N^* = f(N\tau_{II})$ [3, 7, 12]. Для обработки экспериментальных данных целесообразно использовать зависимость [8, 12, 13]

$$N^* = \frac{1}{N} \frac{d\bar{u}}{d\tau} = \exp(-aN\tau_{II}). \quad (13)$$

Обработкой опытных данных по сушке различных материалов получено уравнение [12, 13, 16]

$$\tau_{II} \approx -\frac{1}{aN} \ln(1 - a(\bar{u}_{kp} - \bar{u})). \quad (14)$$

Коэффициент a определяется общим для всех материалов выражением

$$a \approx \frac{0,8}{\bar{u}_{kp}}. \quad (15)$$

На рис. 2б дана зависимость $a = f(1 / \bar{u}_0)$ для сушки керамики, войлока и асбеста. Зависимость выражается формулой

$$a \approx \frac{1,75}{\bar{u}_0} - 0,42. \quad (16)$$

Подставляя (15) в (16), после простых преобразований получим

$$\bar{u}_{kp} \approx \frac{0,8 \bar{u}_0}{1,75 - 0,42 \bar{u}_0}. \quad (17)$$

В процессе сушки керамики, асбеста, войлока с погрешностью до 10 % при расчетах длительности сушки можно использовать (17).

Для определения численных значений коэффициентов в уравнениях (5)–(10) проведена обработка опытных данных для процессов конвективной сушки керамики, асбеста и войлока. Получены следующие приближенные зависимости для коэффициентов в уравнениях (5)–(10):

$$A \approx \frac{4,19}{\bar{u}_0}; \quad \Phi \approx 0,41 \bar{u}_{kp};$$

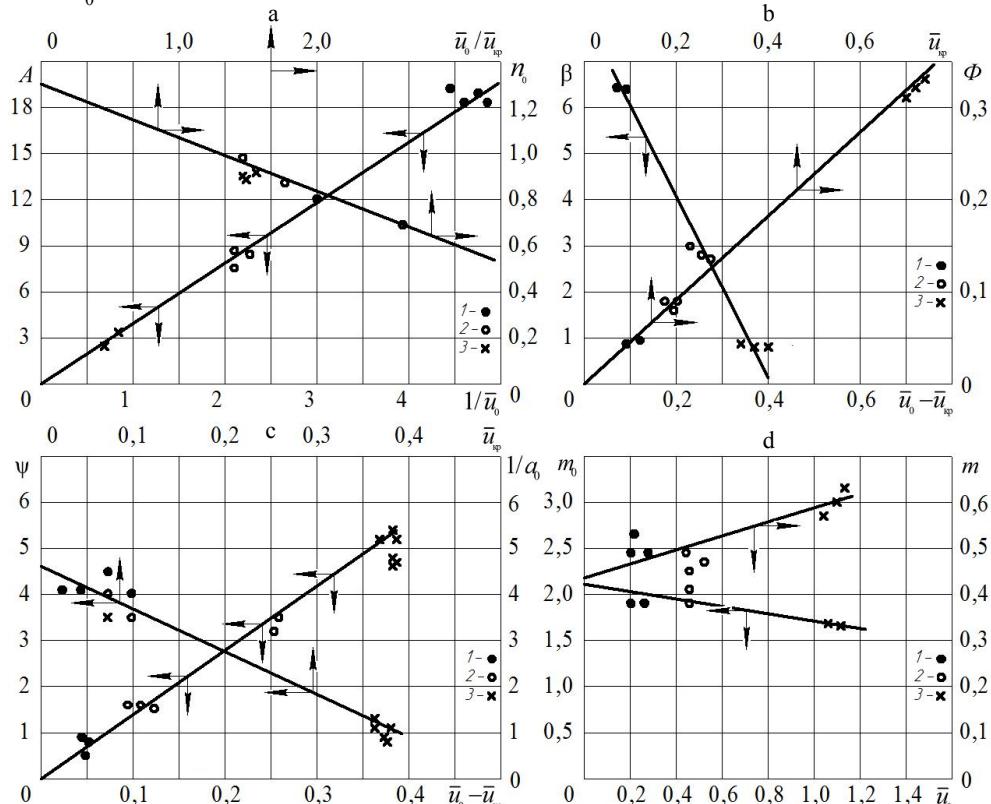


Рис. 4. Зависимости: коэффициента A от $1/\bar{u}_{kp}$ и коэффициента n_0 от отношения влагосодержаний \bar{u}_0 / \bar{u}_{kp} (а); коэффициента β от $(\bar{u}_0 - \bar{u}_{kp})$ и коэффициента Φ от влагосодержания \bar{u}_{kp} (б); коэффициентов Z и $1/a$ от разности влагосодержаний $(\bar{u}_0 - \bar{u}_{kp})$ и коэффициента ψ от влагосодержания \bar{u}_{kp} (в); коэффициентов m и m_0 от влагосодержания \bar{u}_0 (г)

в процессах сушки керамики (1), асбеста (2) и войлока (3). Режимы сушки: $t_c = 90$ и 120°C ; $v = 5 \text{ м/с}$

Fig. 4. Dependence of the coefficient A on the value $1/\bar{u}_{kp}$ and the coefficient n_0 on the ratio of moisture contents \bar{u}_0 / \bar{u}_{kp} (a). Dependence of the coefficient β on $(\bar{u}_0 - \bar{u}_{kp})$ and coefficient Φ on the moisture content \bar{u}_{kp} (b). Dependences of the coefficients Z and $1/a$ on the difference in moisture contents $(\bar{u}_0 - \bar{u}_{kp})$ and the coefficient ψ on the moisture content \bar{u}_{kp} (c). Dependences of the coefficients m and m_0 on the moisture content \bar{u}_0 (d) in the drying processes of ceramics (1), asbestos (2) and felt (3). Drying modes $t_c = 90$ and 120°C ; $v = 5 \text{ m/s}$

Таблица 2

**Расчет длительности сушки керамики, асбеста и войлока по формулам (5)–(8)
и сопоставление расчетных значений с опытными**

**Calculation of drying time using formulas (5), (6), (7) and (8) for drying ceramics, asbestos,
felt and comparison of calculated values with experimental ones**

Керамика: пластина 120×80×5 мм; $\rho_0 = 1860 \text{ кг/м}^3$. Режим сушки: температура сушильного агента (воздуха) $t_c = 120^\circ\text{C}$; скорость воздуха $v = 5 \text{ м/с}; N = 0,022 \text{ мин}^{-1}$; $\bar{u}_0 = 0,2$; $\bar{u}_{kp} = 0,1$; $\bar{u}_p = 0$						
\bar{u}	\bar{u} / \bar{u}_0	$\tau, \text{мин}$ экс	$\tau, \text{мин}$ (5)	$\tau, \text{мин}$ (6)	$\tau, \text{мин}$ (7)	$\tau, \text{мин}$ (8)
0,12	0,6	4,0	3,6	3,8	3,9	3,7
0,08	0,4	6,0	5,8	5,6	6,4	6,2
0,06	0,3	8,0	7,6	7,8	8,5	8,3
0,04	0,2	11,0	11,4	10,7	11,4	10,7
0,02	0,1	15,5	—	—	16,3	15,8

Асбест: пластина 180×100×6 мм; $\rho_0 = 770 \text{ кг/м}^3$. Режим сушки: $t_c = 120^\circ\text{C}$; $v = 5 \text{ м/с}; N = 0,028 \text{ мин}^{-1}$; $\bar{u}_0 = 0,46$; $\bar{u}_{kp} = 0,2$; $\bar{u}_p = 0$						
\bar{u}	\bar{u} / \bar{u}_0	$\tau, \text{мин}$ экс	$\tau, \text{мин}$ (5)	$\tau, \text{мин}$ (6)	$\tau, \text{мин}$ (7)	$\tau, \text{мин}$ (8)
0,28	0,600	6,5	6,4	6,8	6,4	6,5
0,20	0,430	10,5	9,8	10,2	10,7	10,5
0,12	0,260	15,5	15,2	14,5	16,3	15,4
0,08	0,170	19,5	20,7	19,3	21,4	20,0
0,04	0,087	26,5	—	—	27,8	26,2

Войлок: пластина 135×100×10 мм; $\rho_0 = 170 \text{ кг/м}^3$. Режим сушки: $t_c = 120^\circ\text{C}$; $v = 3 \text{ м/с}; N = 0,066 \text{ мин}^{-1}$; $\bar{u}_0 = 1,14$; $\bar{u}_{kp} = 0,75$; $\bar{u}_p = 0$						
\bar{u}	\bar{u} / \bar{u}_0	$\tau, \text{мин}$ экс	$\tau, \text{мин}$ (5)	$\tau, \text{мин}$ (6)	$\tau, \text{мин}$ (7)	$\tau, \text{мин}$ (8)
0,90	0,79	4,0	4,2	4,1	3,7	3,6
0,75	0,66	6,0	6,2	5,8	6,5	6,1
0,60	0,53	9,5	9,5	9,2	10,0	9,3
0,40	0,40	15,3	15,8	16,0	14,8	15,2
0,20	0,18	23,5	22,6	—	24,8	23,8

Таблица 3

**Расчет длительности сушки керамики, асбеста и войлока по формулам (10) и (12) для режимов второго периода,
указанных в табл. 2**

**Calculation of the drying time of ceramics, asbestos and felt using formulas (10) and (12) for the second period of
drying modes specified in Table 2**

Керамика			Асбест			Войлок			
для режимов сушки, указанных в табл. 2									
\bar{u}	$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{kp}}$	$\tau, \text{мин}$ экс	$\tau, \text{мин}$ (10)	$\tau, \text{мин}$ (12)	\bar{u}	$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{kp}}$	$\tau, \text{мин}$ экс	$\tau, \text{мин}$ (10)	$\tau, \text{мин}$ (12)
0,08	0,8	2,0	1,6	1,7	0,16	0,8	2,5	2,2	2,2
0,06	0,6	3,5	3,5	3,5	0,12	0,6	4,5	4,3	4,4
0,05	0,5	5,5	5,3	5,5	0,08	0,4	8,5	8,6	8,6
0,04	0,4	8,5	8,2	8,4	0,04	0,2	16,5	17,0	16,0
0,02	0,2	12,5	—	11,3	0,02	0,1	24,5	23,7	23,5

ВЫВОДЫ

- На основе аппроксимации обобщенной кривой сушки гиперболической, степенной и экспоненциальной зависимостями получены уравнения для обобщенной кривой сушки и расчетные формулы для определения времени сушки без построения кривых скорости сушки.
- Приведенная методика обработки опытных данных может быть использована для процессов сушки различных материалов. Со-

поставление расчетных значений времени сушки, полученных по формулам, хорошо согласуется с экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

- Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 472 с.
- Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. Минск: Белорус. наука, 2010. 443 с.
- Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. М.: Энергия, 1973. 288 с.

4. Сажин, Б. С. Научные основы техники сушки / Б. С. Сажин, В. Б. Сажин. М.: Наука, 1997. 447 с.
5. Рудобашта, С. П. Теплотехника / С. П. Рудобашта. 2-е изд., доп. М.: Пере, 2015. 672 с.
6. Куц, П. С. Некоторые закономерности тепловлагообмена и приближенные методы расчета кинематики процесса сушки влажных материалов / П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. 1977. Т. 32, № 6. С. 1007–1014.
7. Васильев, В. Н. Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса: учеб. / В. Н. Васильев, В. Е. Кузакова, С. В. Фролов. СПб.: ГИОРД, 2013. 222 с.
8. Филоненко, Г. К. Сушильные установки / Г. К. Филоненко, П. Д. Лебедев. М.: Энергоиздат, 1952. 263 с.
9. Жучков, П. А. Специальный курс лекций по расчету тепло- и массообмена в процессах сушки и горения / П. А. Жучков. Л., 1963. 322 с.
10. Ольшанский, А. И. Некоторые закономерности кинетики сушки пищевых продуктов / А. И. Ольшанский, П. С. Куц // Изв. высш. учеб. заведений. Пищевая технология. 1977. № 5. С. 97–107.
11. Ольшанский, А. И. Исследование кинетики тепловлагообмена при термической обработке и сушке тонких влажных теплоизоляционных материалов / А. И. Ольшанский, 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>.
12. Ольшанский, А. И. Обобщенные комплексные переменные кинетики сушки в расчетах длительности сушки плоских тонких влажных материалов / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 4. С. 363–376. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-363-376>.
13. Ольшанский, А. И. Исследование сушки тонких материалов с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. 2016. Т. 89, № 4. С. 884–894.
14. Демидович, Б. П. Численные методы анализа: приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения / Б. П. Демидович, И. А. Марон, Э. З. Шувалова. 3-е изд. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1967. 368 с.
15. Лыков, А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / А. В. Лыков. М.: Госэнергоиздат, 1956. 462 с.
16. Ольшанский, А. И. Кинетика влагообмена в процессе конвективной сушки тонких плоских влажных материалов / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // Вес. нац. акад. навук Беларуси. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2024. Т. 69, № 3. С. 206–214. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-206-214>.
17. Михеева, Н. С. Исследование механизма сушки влажных материалов / Н. С. Михеева // Тепло- и массообмен в пищевых продуктах: сб. ст. М.: Пищепромиздат, 1956. С. 64–77. (Труды / МТИПП; вып. 6).
3. Krasnikov V. V. (1973) *Conductive Drying*. Moscow, Energiya Publ. 288 (in Russian).
4. Sazhin B. S., Sazhin V. B. (1997) *Scientific Basics of Drying Technology*. Moscow, Nauka Publ. 447 (in Russian).
5. Rudobashta S. P. (2015) *Thermal Engineering*. 2nd Ed. Moscow, Pero Publ. 672 (in Russian).
6. Kuts P. S., Ol'shanskii A. I. (1977) Some features of heat and moisture transfer and approximate methods of calculating the drying kinetics of moist materials. *Journal of Engineering Physics*, 32 (6), 650–656. <https://doi.org/10.1007/bf00862568>.
7. Vasiliev V. N. Kutsakova V. E., Frolov S. V. (2013) *Drying Technology. Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. St. Petersburg, GIORD Publ. 222 (in Russian).
8. Filonenko G. K., Lebedev P. D. (1952) *Drying Plants*. Moscow, Energoizdat Publ. 263 (in Russian).
9. Zhuchkov P. A. (1963) *Special Course of Lectures on Calculation of Heat and Mass Transfer in Drying and Combustion Processes*. Leningrad. 322 (in Russian).
10. Ol'shanskii A. I. (1977) Some Regularities of Drying Kinetics of Food Products. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Pishchevaya Tekhnologiya = Izvesiyia vuzov. Food Technology*, (5), 97–107 (in Russian).
11. 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).
12. Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. (2024) Generalized Complex Variables of Drying Kinetics in Calculations of Drying Duration of Flat Thin Wet Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (4), 363–376. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-363-376> (in Russian).
13. Ol'shanskii A. I. (2016). Investigation of the Drying of Thin Materials with the use of Generalized Complex Variables. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 89 (4), 886–895. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1450-4>.
14. Demidovich B. P., Shuvalova E. Z. (1967) *Numerical Methods of Analysis: Approximation of Functions, Differential and Integral Equations*. 3rd Ed. Moscow, Nauka Publ. 368 (in Russian).
15. Lykov A. V. (1956) *Heat and Mass Transfer in Drying Processes*. Moscow, Gosenergoizdat Publ. 462 (in Russian).
16. Ol'shanskii, A. I., & Golubev, A. N. (2024). Kinetics of Moisture Exchange During Convection Drying of thin Flat Wet Materials. *Vestsi Natsiyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-tehnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, 69(3), 206–214. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-206-214> (in Russian).
17. Mikheeva N. S. (1956) Study of the Drying Mechanism of Wet Materials. *Teplo- i massoobmen v pishchevykh produktakh: sb. st. Trudy MTIPP, Vyp. 6. [Teplo- i massoobmen v pishchevykh produktakh: sb. st. Trudy Moscow Institute of Food Science and Technology, Iss. 6. Moscow: Pishchepromizdat Publ., 64–77* (in Russian).

Поступила 07.07.2025
Подписана в печать 10.09.2025
Опубликована онлайн 28.11.2025

REFERENCES

1. Lykov A. V. (1968) *Drying Theory*. Moscow, Energiya Publ. 472 (in Russian).
2. Akulich P. V. (2010) *Calculations of Drying and Heat Exchange Installations*. Minsk, Belorusskaya Nauka Publ. 443 (in Russian).

Received: 07.07.2025

Accepted: 10.09.2025

Published online: 28.11.2025