

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-206-214>

УДК 66.047.7

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

Аннотация. Исследована кинетика конвективной сушки тонких влажных теплоизоляционных материалов на основе относительных скорости сушки и влагосодержаний. Обработкой опытных данных по сушке различных влажных материалов установлено, что относительная скорость процесса связана с относительными влагосодержаниями, представляющими собой отношения значения текущего влагосодержания к его критическому и начальному значениям. На основе функциональной зависимости относительной скорости сушки от относительных влагосодержаний обработкой экспериментальных данных по сушке керамики, войлока, асбеста получены уравнения для расчета длительности сушки. Представлена зависимость относительной скорости сушки от отношения текущего влагосодержания к критическому. Даны зональные методы расчета длительности процесса, основанные на кривой скорости сушки. Разработано выражение для определения коэффициента сушки. На основе анализа опытных данных по сушке пористой керамики, листового асбеста, шерстяного войлока построены графики зависимости относительной скорости сушки от отношения текущего влагосодержания к начальному. Показаны зависимости для определения критического влагосодержания материала. Рассмотренный метод обработки опытных данных позволяет получить все основные уравнения для расчета кинетики процесса сушки. Дан вариант оценки длительности процесса по одному эксперименту с малым промежутком времени. Выполнено сравнение расчетных величин по уравнениям с экспериментом. Разброс расчетных значений находится в области погрешности эксперимента. Формулы для расчета длительности сушки, полученные без построения кривой скорости сушки, позволяют значительно сократить время обработки опытных данных и могут быть применимы к другим материалам.

Ключевые слова: влагосодержание, скорость сушки, коэффициент сушки, критическое влагосодержание, время сушки

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. Кинетика влагообмена в процессе конвективной сушки тонких плоских влажных материалов / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // Вест. нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 206–214. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-206-214>

Поступила в редакцию: 04.03.2024

Доработанный вариант: 09.09.2024

Утверждена к публикации: 17.09.2024

Подписана в печать: 24.09.2024

Original article**Anatoly I. Ol'shanskii, Alexey N. Golubev****Vitebsk State Technological University, 72, Moskovsky Ave., 210038, Vitebsk, Republic of Belarus***KINETICS OF MOISTURE EXCHANGE DURING CONVECTION DRYING
OF THIN FLAT WET MATERIALS**

Abstract. The kinetics of convective drying of thin wet thermal insulation materials based on the relative drying rate and relative moisture contents has been studied. Processing of experimental data on drying of various wet materials has established that the relative drying rate is related to the relative moisture contents, which are the ratios of the current moisture content

¹ Ольшанский А. И., Голубев А. Н., 2024

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

to its critical and initial values. Based on the functional dependence of the relative drying rate on the relative moisture contents using the processing of the experiment on drying of ceramics, felt, and asbestos, equations for calculating the drying time are obtained. The dependence of the relative drying rate on the ratio of the current moisture content to the critical one is given. Zonal methods for calculating the drying time are given, based on the drying rate curve. An expression for determining the drying coefficient is developed. Based on the analysis of experimental data on drying porous ceramics, sheet asbestos, and wool felt, graphs of the dependence of the relative drying rate on the ratio of the current moisture content to the initial one are constructed. Dependencies for determining the critical moisture content of the material are given. The considered method of processing experimental data allows obtaining all the main equations for calculating the kinetics of the drying process. A variant of estimating the drying time based on one experiment with a short time interval is given. A comparison of the calculated values according to the equations with the experiment is performed. The spread of the calculated values is in the range of experimental error. The formulas for calculating the drying time obtained without plotting the drying rate curve allow significantly reducing the time of processing the experimental data and can be applied to other materials.

Keywords: moisture content, drying speed, drying coefficient, critical moisture content, drying time

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

Information about the authors: *Anatoly I. Ol'shanskii* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor at Vitebsk State Technological University. <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. Kinetics of moisture exchange during convection drying of thin flat wet materials. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 4, pp. 206–214 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-206-214>

Received: 04.03.2024

Modified: 09.09.2024

Approved for publication: 17.09.2024

Signed to the press: 24.09.2024

Введение. Основной задачей кинетики сушки является расчет длительности процесса, поскольку время сушки совместно с температурой определяет не только технологические свойства высушиваемого материала, но и конструкцию, размеры сушильной камеры, выбор метода сушки и способ подвода энергоносителя [1–4, 19]. Все необходимые зависимости для расчета продолжительности процесса сушки можно получить из решения дифференциального уравнения тепломассопереноса [1–5]. Однако теоретическое решение часто оказывается очень сложным, поскольку сушка – процесс нестационарный и коэффициенты тепломассообмена изменяются в зависимости от влагосодержания и температуры [1–5]. Невозможность получения точного аналитического решения вызывает необходимость в проведении экспериментальных исследований [2–7, 19–20]. Наиболее эффективными методами обработки опытных данных являются методы, которые основаны на наиболее общих закономерностях сушки, характеризующих общие свойства влажного тела [6, 8].

Цель исследования – получить на основе обработки опытных данных простые и надежные эмпирические уравнения для расчета длительности сушки.

Вывод расчетных формул. Эксперимент. Г. К. Филоненко и А. В. Лыковым была введена важная для кинетики сушки обобщенная переменная N^* – относительная скорость сушки [1–3, 8, 9]:

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

где N – скорость сушки (мин^{-1}) в период постоянной скорости (первый период сушки), $d\bar{u}/d\tau$ – скорость сушки (с^{-1}) в период падающей скорости сушки (второй период сушки).

При разработке двухзонального метода расчета длительности сушки [8] В. В. Красников установил, что величина N^* не зависит от режима сушки и для конкретного материала при данном методе сушки является только функцией влагосодержания [1, 3, 8]. Выводы В. В. Красникова по относительной скорости сушки N^* совпадают с выводами Г. К. Филоненко [8, 9] относительно приведенной скорости сушки.

Анализ опытных данных по сушке ряда различных влажных материалов показал, что относительная скорость сушки N^* связана с относительными влагосодержаниями \bar{u}/\bar{u}_0 и $\bar{u}/\bar{u}_{\text{кр}}$ при

различных начальных и критических влагосодержаниях \bar{u}_0 и $\bar{u}_{кр}$ [1, 8–10]. Относительная скорость сушки N^* и переменная $\bar{u}/\bar{u}_{кр}$ связывают между собой все переменные процесса, где скорость в первом периоде N является главным связующим фактором [7, 10, 11]:

$$N^* = \frac{1}{N} \frac{d\bar{u}}{d\tau} = A \exp\left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right). \quad (2)$$

В результате обработки эксперимента по сушке пористой керамики, листового асбеста, шерстяного войлока получено уравнение для расчета длительности сушки во втором периоде [7]

$$\tau_{II} \approx \frac{\bar{u}_{кр}}{NA} \left[\ln\left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} + 1\right) \right], \quad (3)$$

где коэффициент A приближенно аппроксимируется выражением [7]

$$A \approx A_0 (\bar{u}/\bar{u}_{кр})^{2,5},$$

а коэффициент A_0 является линейной функцией критического влагосодержания

$$A_0 \approx 2,36 + 2\bar{u}_{кр}.$$

Обработкой опытных данных по сушке пористой керамики, листового асбеста, шерстяного войлока для режимов сушки $t_c = 90; 120$ °С, $v = 3; 5$ м/с получена формула

$$N^* \approx (\bar{u}/\bar{u}_{кр})^{1,3}. \quad (4)$$

На рисунке, b даны результаты обработки опытных данных по уравнению (4). Запишем уравнение (4) в виде:

$$-\frac{1}{N} \frac{d\bar{u}}{(\bar{u}/\bar{u}_{кр})^n} = d\tau; \quad -\frac{1}{N} \int_{\bar{u}_{кр}}^{\bar{u}} \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right)^{-n} d\bar{u} = \int_0^{\tau_{II}} d\tau. \quad (5)$$

Интегрирование уравнения (5) дает время сушки в периоде падающей скорости:

$$\tau_{II} \approx -\frac{1}{N} \frac{\bar{u}_{кр}}{1-n} \left[\left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right)^{1-n} - 1 \right]. \quad (6)$$

Для случая показателя степени $n > 1$ уравнение (6) можно записать в виде

$$\tau_{II} \approx \frac{1}{N} \left[\left(\frac{\bar{u}_{кр} - \bar{u}}{n-1}\right) \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right)^{n-1} \right], \quad (7)$$

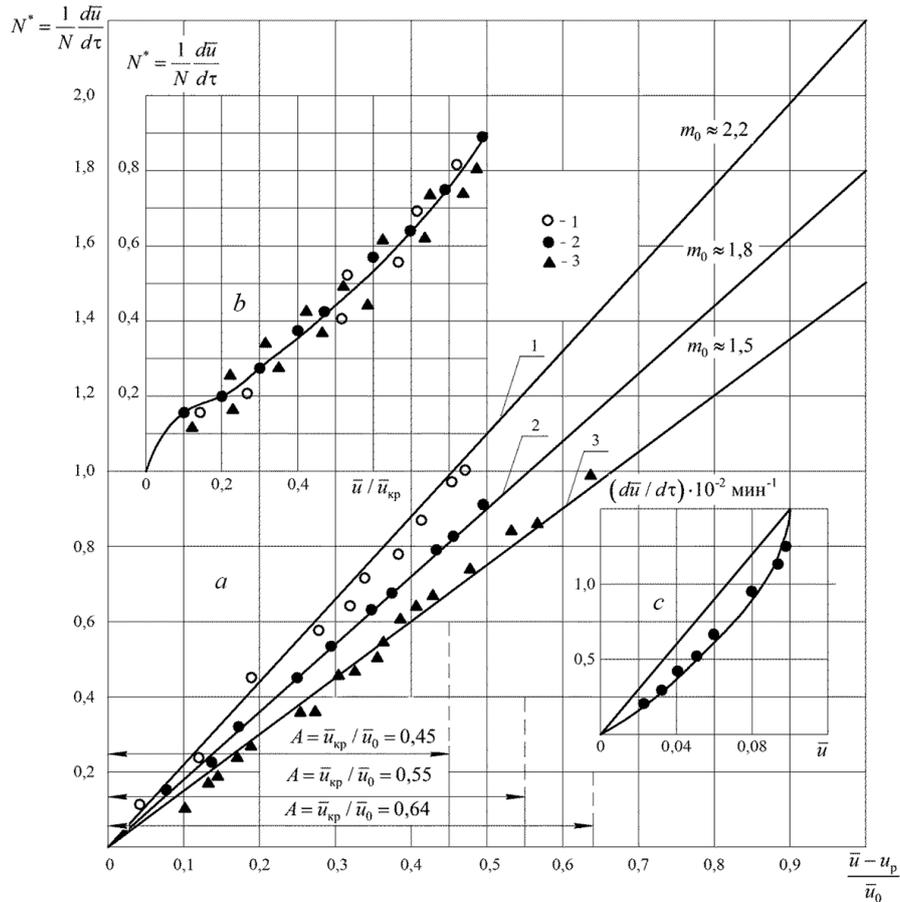
где $n = 1,3$ из уравнения (4).

Обработкой эксперимента по сушке войлока, асбеста, керамики для комплексной переменной $N^* = f\left(\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_0}\right)$ получена графическая зависимость, из которой видно, что продолжение прямых, полученных для исследуемых материалов, до пересечения с вертикалью $\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_0} = 1$ отсекают отрезки, численно равные значениям m_0 [1, 12, 13]. Равновесное влагосодержание $u_p = 0$ при $t > 90$ °С.

Используя графические зависимости (см. рисунок, a), можно найти уравнения для кривой скорости сушки [1, 12]

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} \approx m_0 N \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_0}\right) \quad (8)$$

и относительной скорости сушки



Зависимость относительной скорости сушки N^* от безразмерных влагосодержаний \bar{u} / \bar{u}_0 (a) и $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$ (b) в процессах сушки листового асбеста (1), пористой керамики (2), шерстяного войлока (3); аппроксимация кривой скорости сушки прямой для сушки пористой керамики (c) при режиме сушки: $t_c = 120$ °C, $v = 3$ м/с.

Dependence of the relative drying rate N^* on the dimensionless moisture content \bar{u} / \bar{u}_0 (a) and $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$ (b) in the drying processes of sheet asbestos (1), porous ceramics (2), wool felt (3); approximation of the straight line drying rate curve for drying porous ceramics (c) under drying mode: $t_c = 120$ °C, $v = 3$ m/s

$$N^* \approx m_0 \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_0} \right). \quad (9)$$

По оси абсцисс образуются отрезки

$$\frac{\bar{u}_{кр}}{\bar{u}_0} \approx m. \quad (10)$$

Условное критическое влагосодержание из (10) определяется соотношением [1, 12, 13]

$$\bar{u}_{кр} \approx m u_p, \quad (11)$$

где коэффициент m определяется родом влажного тела, не зависит от режима сушки и принимает следующие значения:

- для керамики и пластин глины $m \approx 0,55$;
- для листового асбеста $m \approx 0,45$;
- для шерстяного войлока $m \approx 0,64$.

Уравнение (11) является приближенным и с погрешностью до 10 % определяет величину $\bar{u}_{кр}$, которая необходима в расчетах длительности сушки [1, 3, 6, 8, 12]. В простейшем случае для определения длительности процесса сушки применяют линейную аппроксимацию кривой скорости сушки (см. рисунок, c) при постоянном значении коэффициента сушки K (однозональный

метод А. В. Лыкова) [1, 2, 3, 6–8, 11, 12]. В соответствии с уравнением спрямляющей прямой при $K = \text{const}$ скорость сушки [1, 3, 6, 8, 11, 12] выражается уравнением

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} \approx K(\bar{u} - u_p). \quad (12)$$

Интегрируя уравнение (12) [2, 3, 8, 11], получим длительность сушки во втором периоде:

$$\tau_{II} = -\frac{1}{K} \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p}. \quad (13)$$

На основе обобщенных кривых сушки Г. К. Филоненко [9] В. В. Красников [8] получил уравнение для определения скорости сушки

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = NN^*. \quad (14)$$

Из уравнений (12), (14) коэффициент сушки K равен:

$$K \approx -\frac{NN^*}{\bar{u} - u_p}. \quad (15)$$

Подставляя уравнение (4) в (15), получим

$$K \approx -\frac{N(\bar{u} / \bar{u}_{кр})^{1,3}}{\bar{u} - u_p}. \quad (16)$$

Следовательно, в общем случае коэффициент сушки K – величина переменная.

Для примера определим длительность сушки пористой керамики. Режим сушки $t_c = 120$ °С, $v = 3$ м/с; параметры: $N = 0,015$ мин⁻¹; $\bar{u}_{кр} = 0,1$; при $\bar{u} = 0,08$ $K \approx \frac{0,015 \cdot 0,748}{0,08} \approx 0,14$ мин⁻¹; при $\bar{u} = 0,02$ $K \approx \frac{0,015 \cdot 0,123}{0,02} \approx 0,092$ мин⁻¹.

Подставляя в (13) уравнение (16), запишем

$$\tau_{II} \approx -\frac{\bar{u} - u_p}{N(\bar{u} / \bar{u}_{кр})^{1,3}} \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p}. \quad (17)$$

На основе графической зависимости $N^* = f(\bar{u} / \bar{u}_0)$ [1, 12] и обработки опытных данных по конвективной сушке материалов Н. С. Михеевой получено простое уравнение для расчета длительности сушки [14]

$$\tau = \tau_I + \tau_{II} \approx \frac{m_0}{N} \left[(\bar{u}_0 - u_p) - m\bar{u}_0 \right] \ln \frac{\bar{u}_0}{\bar{u} - u_p}, \quad (18)$$

где коэффициент $m \approx \bar{u}_{кр} / \bar{u}_0$.

В [12] А. В. Лыковым приводится простая формула для расчета длительности конвективной сушки

$$\tau_{II} \approx -\frac{\bar{u}_0}{m_0 N} \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p}; \quad \bar{u} < \bar{u}_{кр}; \quad u_p = 0. \quad (19)$$

Подставляя выражение (11) в (19), получим

$$\tau_{II} \approx -\frac{\bar{u}_0}{m_0 N} \ln \left[\frac{1}{m} \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_0} \right) \right]. \quad (20)$$

Исследование сушки тонких материалов (пористой керамики, листового асбеста, шерстяного войлока, сукна, фетра, пластин глины, технического картона, подошвенной кожи, пластин моркови) осуществлялось конвективным методом подвода тепла в сушильной установке сушильно-термической лаборатории Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. Обработка полученных опытных данных была проведена методом наименьших квадратов. В результате для относительной скорости сушки $N^* = f(N\tau_{II})$, авторами установлена зависимость [6, 15, 16]

$$N^* = -\frac{1}{N} \frac{d\bar{u}}{d\tau} = \exp(-aN\tau_{II}), \quad (21)$$

где $N\tau_{II}$ – обобщенное время сушки.

Интегрируя уравнение (21), получим время сушки во втором периоде [15, 16]:

$$\tau_{II} \approx -\frac{1}{aN} \ln[1 - a(\bar{u}_{кр} - \bar{u})]. \quad (22)$$

Коэффициент a для всех влажных материалов определяется общей зависимостью [6, 15, 16]

$$a \approx \frac{0,8}{\bar{u}_{кр}}. \quad (23)$$

Подставляя выражение (11) в (23) и (22), после простых преобразований получим

$$\tau_{II} \approx -\frac{m\bar{u}_0}{0,8N} \ln\left(1 - 0,8\left(1 - \frac{\bar{u}}{m\bar{u}_0}\right)\right). \quad (24)$$

Характерные свойства материалов. Пористая керамика относится к типичным капиллярно-пористым материалам, влага в микрокапиллярах которые в основном связана с капиллярными силами. Для получения керамики используются легкоплавкие силикатные глины, чтобы получить керамический черепок во время обжига при высоких температурах 800–900 °С. Глины относятся к капиллярно-пористым коллоидным высокодисперсным телам с пористой структурой с развитой системой микро- и макропор. Глины хорошо сорбируют из паровоздушной среды значительное количество влаги, часть которой удерживается в микропорах капиллярными силами. Войлок, асбест, картон – капиллярно-пористые волокнистые тела, относящиеся к теплоизоляционным материалам.

Основные сведения по характеристикам материалов приводятся в [20–25].

В таблице дано сравнение расчетных значений основных параметров кинетики сушки, полученных по формулам, с экспериментальными значениями. Несовпадение значений находится в области погрешности до 10 %.

Для практики сушки представляет интерес возможность приближенно оценить ее длительность без проведения эксперимента [11–13]. Для этого необходимо иметь зависимость, устанавливающую связь между влагосодержанием материала и временем сушки [1, 12]. При наличии такой связи определяется длительность сушки. Практически все экспериментальные уравнения для расчета времени сушки содержат скорость сушки в первом периоде N и критическое влагосодержание $\bar{u}_{кр}$ [1]. Критическое влагосодержание $\bar{u}_{кр}$ при известных значениях коэффициентов m и m_0 для материалов рассчитывается по формуле (11). Необходимый параметр N в первом приближении можно определить по методу Докучаева–Смирнова [17, 18] следующим способом: от начального влагосодержания \bar{u}_0 выбирается близкое к нему произвольное значение \bar{u}_1 , соответствующее времени сушки τ_1 . Находится направление прямой из образующего треугольника со сторонами $\Delta\bar{u} = \bar{u}_0 - \bar{u}_1$; $\Delta\tau = \tau_1$, которое определяет величину $N \approx \text{tg} \frac{\Delta\bar{u}}{\Delta\tau} = \text{tg} \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_1}{\tau_1}$. Расчеты величины N по такому способу дают несовпадение с действительным значением N в 5–8% [13, 18].

Сравнение расчетных значений скорости сушки, относительной скорости сушки, длительности сушки с экспериментальными значениями в процессах сушки листового асбеста, пористой керамики и шерстяного войлока

Comparison of calculated values of drying speed, relative drying speed, drying duration with experimental values in the drying processes of sheet asbestos, porous ceramics and wool felt

Листовой асбест. Пластина 130 × 80 × 6 мм; ρ = 770 кг/м ³ ; $\bar{u}_0 = 0,46$; $\bar{u}_{кр} = 0,20$; $u_p = 0$. Режим сушки: $t_c = 120$ °С; $v = 5$ м/с; φ = 5 %; $N \approx 0,025$ мин ⁻¹ ; $\bar{u}_{кр(φ)} \approx 0,195$										
\bar{u}	$\bar{u} / \bar{u}_{кр}$	N^* (эксперимент)	N^* (4)	N^* (9)	$\frac{d\bar{u}}{d\tau}$, мин ⁻¹ (эксперимент)	$\frac{d\bar{u}}{d\tau}$, мин ⁻¹ (8)	τ_{II} , мин (эксперимент)	τ_{II} , мин (3)	τ_{II} , мин (17)	τ_{II} , мин (7)
0,16	0,8	0,72	0,73	0,71	0,021	0,019	2,5	2,8	2,7	2,2
0,14	0,7	0,62	0,60	0,61	0,018	0,017	3,5	3,3	3,4	3,4
0,12	0,6	0,51	0,50	0,49	0,015	0,014	5,0	5,4	5,2	5,4
0,08	0,4	0,34	0,32	0,31	0,011	0,0096	9,5	9,8	9,8	10,2
0,04	0,2	0,19	0,17	0,17	0,0053	0,0048	12,5	12,9	12,7	12,8
0,02	0,1	0,085	0,078	0,089	0,0025	0,0023	18,5	19,3	19,5	20,0
Пористая керамика. Пластина 130 × 80 × 5 мм; ρ = 1860 кг/м ³ ; $\bar{u}_0 = 0,20$; $\bar{u}_{кр} = 0,1$; $u_p = 0$. Режим сушки: $t_c = 120$ °С; $v = 3$ м/с; φ = 5 %; $N = 0,015$ мин ⁻¹ ; $\bar{u}_{кр(φ)} = 0,11$										
\bar{u}	$\bar{u} / \bar{u}_{кр}$	N^* (эксперимент)	N^* (4)	N^* (9)	$\frac{d\bar{u}}{d\tau}$, мин ⁻¹ (эксперимент)	$\frac{d\bar{u}}{d\tau}$, мин ⁻¹ (8)	τ_{II} , мин (эксперимент)	τ_{II} , мин (3)	τ_{II} , мин (17)	τ_{II} , мин (7)
0,08	0,8	0,73	0,72	0,72	0,010	0,011	2,5	2,7	2,8	2,2
0,06	0,6	0,52	0,53	0,53	0,0082	0,008	4,5	4,8	5,1	3,9
0,04	0,4	0,34	0,36	0,33	0,0048	0,005	8,5	9,1	8,9	7,9
0,02	0,2	0,18	0,17	0,18	0,0027	0,0024	12,5	12,4	12,8	12,4
Шерстяной войлок. Пластина 150 × 120 × 8 мм; ρ = 200 кг/м ³ ; $\bar{u}_0 = 1,14$; $\bar{u}_{кр} = 0,75$; $u_p = 0$. Режим сушки: $t_c = 120$ °С; $v = 5$ м/с; φ = 5 %; $N = 0,055$ мин ⁻¹ ; $\bar{u}_{кр(φ)} = 0,73$										
\bar{u}	$\bar{u} / \bar{u}_{кр}$	N^* (эксперимент)	N^* (4)	N^* (9)	$\frac{d\bar{u}}{d\tau}$, мин ⁻¹ (эксперимент)	$\frac{d\bar{u}}{d\tau}$, мин ⁻¹ (8)	τ_{II} , мин (эксперимент)	τ_{II} , мин (3)	τ_{II} , мин (17)	τ_{II} , мин (7)
0,6	0,80	0,77	0,80	0,76	0,049	0,051	3,5	3,8	3,7	3,9
0,5	0,67	0,62	0,65	0,59	0,038	0,039	6,5	5,9	5,7	6,7
0,4	0,53	0,48	0,52	0,45	0,027	0,025	9,5	9,1	8,9	10,2
0,3	0,40	0,38	0,37	0,32	0,018	0,019	13,5	12,8	13,5	14,2
0,2	0,27	0,24	0,24	0,19	0,011	0,0096	18,5	18,6	17,8	19,3

Примечание: φ – относительная влажность воздуха; $\bar{u}_{кр(φ)}$ – критическое влагосодержание, определенное по формуле (11).

Note: φ is the relative humidity of the air; $\bar{u}_{кр(φ)}$ is the critical moisture content determined by the formula (11).

Заключение. Рассмотренный способ расчета кинетики сушки, основанный на относительной скорости сушки N^* и относительных влагосодержаниях \bar{u} / \bar{u}_0 и $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$, позволяет получить уравнения для расчета длительности сушки, критического влагосодержания $\bar{u}_{кр}$, которое зависит от режимных параметров сушки. Обработка опытных данных для зависимостей $N^* = \bar{u} / \bar{u}_0$ и $N^* = \bar{u} / \bar{u}_{кр}$ в процессе сушки керамики, асбеста, войлока дана впервые. Проверка достоверности уравнений при сопоставлении с экспериментальными данными дает разброс значений в области погрешности до 10 %.

Формулы для расчета длительности сушки, полученные без построения кривой скорости сушки, позволяют значительно ускорить обработку опытных данных. Метод обработки опытных данных на основе относительной скорости сушки может быть применен и для других 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. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 443 с.
3. Рудобашта, С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. – М.: Химия, 1980. – 248 с.
4. Сажин, Б. С. Научные основы техники сушки / Б. С. Сажин. – М.: Наука, 1997. – 447 с.
5. Васильев, В. Н. Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса / В. Н. Васильев, В. Е. Куцакова, С. В. Фролов. – СПб.: ГИОРД, 2013. – 224 с.
6. Куц, П. С. Некоторые закономерности теплообмена и приближенные методы расчета кинематики процесса сушки влажных материалов / П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 1977. – Т. 32, № 5. – С. 1007–1014.
7. Ольшанский, А. И. Исследование кинетики теплообмена 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>
8. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. – М.: Энергия, 1973. – 288 с.
9. Филоненко, Г. К. Сушильные установки / Г. К. Филоненко, П. Д. Лебедев. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1952. – 264 с.
10. Ольшанский, А. И. Исследование теплообмена в процессе сушки влажных материалов по экспериментальным данным теплообмена / А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 2014. – Т. 87, № 4. – С. 887–897.
11. Игонин, В. Н. Уравнения кинетики теплообмена при сушке / В. Н. Игонин, М. В. Сотников // Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., 7–8 февр. 2017 г. – Ульяновск: УГСХА им. П. А. Столыпина, 2017. – Ч. 1. – С. 119–123.
12. Лыков, А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / А. В. Лыков. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 462 с.
13. Ольшанский, А. И. Исследование тепло- и массообмена в процессе конвективной термообработки и сушки теплоизоляционных материалов и приближенное уравнение кривой сушки / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2023. – Т. 66, № 5. – С. 461–477. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-461-477>
14. Кавказов, Ю. Л. Тепло- и массообмен в технологии кожи и обуви / Ю. Л. Кавказов. – М.: Легкая индустрия, 1973. – 272 с.
15. Ольшанский, А. И. Некоторые закономерности кинетики сушки пищевых продуктов / А. И. Ольшанский, П. С. Куц // Изв. вузов. Пищевая технология. – 1977. – № 5. – С. 97–101.
16. Ольшанский, А. И. Исследование сушки тонких материалов с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журнал. – 2016. – Т. 89, № 4. – С. 884–894.
17. Смирнов, М. С. Уравнение кривой сушки / М. С. Смирнов // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 1961. – № 3. – С. 77–82.
18. Ольшанский, А. И. Исследование процесса сушки пористой керамики методом Докучаева–Смирнова / А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 2013. – Т. 86, № 1. – С. 77–85.
19. Kudra, T. *Advanced Drying Technologies* / T. Kudra, A. S. Mujumdar. – Taylor & Francis, Inc., Bosa Roca, 2009. – 446 p. <https://doi.org/10.1201/9781420073898>
20. García del Valle, J. Analytical solution for the coupled heat and mass transfer formulation of one-dimensional drying kinetics / J. García del Valle, J. Sierra Pallares // J. Food Eng. – 2018. – Vol. 230. – P. 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.02.029>
21. Беркман, А. С. Пористая проницаемая керамика / А. С. Беркман, И. Г. Мельникова. – Л.: Стройиздат, 1969. – 142 с.
22. Белополюский, М. С. Изменение структуры коллоидного капиллярно-пористого тела (глины) в процессе сушки / М. С. Белополюский // Инженер.-физ. журн. – 1961. – Т. 4, № 4. – С. 49–61.
23. Франчук, А. У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов / А. У. Франчук. – М.: НИИ строительной физики, 1969. – 142 с.
24. Блази, В. Справочник проектировщика. Строительная физика / В. Блази. – М.: Техносфера, 2005. – 535 с.
25. Колесников, П. А. Теплозащитные свойства одежды / П. А. Колесников. – М.: Легкая индустрия, 1965. – 345 с.

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, Belaruskaya Navuka Publ., 2010. 443 p. (in Russian).
3. Rudobashta S. P. *Mass Transfer in Systems with a Solid Phase*. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 248 p. (in Russian).
4. Sazhin B. S. *The Science of Drying Techniques*. Moscow, Nauka Publ., 1997. 447 p. (in Russian).
5. Vasil'ev V. N., Kutsakova V. E., Frolov S. V. *Drying Technology. Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. St. Petersburg, GIORД Publ., 2013. 224 p. (in Russian).
6. Kutz P. S., Ol'shansky A. I. Some Features of Heat and Moisture Transfer and Approximate Methods of Calculating the Drying Kinetics of Moist Materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1977, vol. 32, no. 6, pp. 650–656. <https://doi.org/10.1007/bf00862568>

7. Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. 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*, 2023, vol. 66, no. 1, pp. 66–79 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-66-79>
8. Krasnikov V. V. *Conductive Drying*. Moscow, Energia Publ., 1973. 288 p. (in Russian).
9. Filonenko G. K., Lebedev P. D. *Drying Plants*. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1952. 264 p. (in Russian).
10. Ol'shansky A. I. Study of Heat Transfer During the Drying Process of Wet Materials Based on Experimental Data on Moisture Exchange. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, no. 4, pp. 917–928. <http://doi.org/10.1007/s10891-014-1089-y>
11. Igonin V. N., Sotnikov V. N. Equations of moisture exchange kinetics during drying. *Agrarnaya nauka i obrazovanie na sovremennom etape razvitiya: opyt, problemy i puti ikh resheniya: materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 7–8 fevralya 2017 g.* [Agricultural science and education at the present stage of development: experience, problems and ways to solve them: Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference. February 7–8, 2017]. Ulyanovsk: UGSHA named after P. A. Stolypin, 2017, Part I, pp. 119–123 (in Russian).
12. Lykov A. V. *Heat and Mass Transfer in Drying Processes*. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1956. 462 p. (in Russian).
13. Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. Investigation of Heat and Mass Transfer in the Process of Convective Heat Treatment and Drying of Thermal Insulation Materials and Approximate Equation of the Drying Curve. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 2023, vol. 66, no. 5, pp. 461–477 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-461-477>
14. Kavkazov Yu. L. *Heat and Mass Transfer in Leather and Footwear Technology*. Moscow, Legkaya promyshlennost' Publ., 1973. 272 p. (in Russian).
15. Ol'shansky A. I., Kutz P. S. Some patterns of food drying kinetics. *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya = Izvestiya vuzov. Food Technology*, 1977, vol. 5, pp. 97–101 (in Russian).
16. Ol'shansky 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. 4, pp. 886–895. <http://doi.org/10.1007/s10891-016-1450-4>
17. Smirnov M. S. Drying Curve Equation. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya legkoj promyshlennosti = News of Higher Educational Institutions. Technology of Light Industry*, 1961, vol. 3, pp. 77–82 (in Russian).
18. Ol'shansky A. I. Investigation of the processes of drying of porous ceramics by the Dokuchaev–Smirnov method. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 1, pp. 80–87. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0807-1>
19. Kudra T., Mujumdar A. S. *Advanced Drying Technologies*. Taylor & Francis, Inc., Bosa Roca, 2009. 446 p. <https://doi.org/10.1201/9781420073898>
20. García del Valle J., Sierra Pallares J. Analytical solution for the coupled heat and mass transfer formulation of one-dimensional drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 2018, vol. 230, pp. 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.02.029>
21. Berkman A. S. *Porous Permeable Ceramics*. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1969. 142 p. (in Russian).
22. Belopolsky M. S. The Change in the Structure of a Colloidal Capillary Porous Substance (Clay) during the Drying Process. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1961, vol. 4, no. 4, pp. 49–54.
23. Franchuk A. U. *Tables of Thermal Technical Indicators of Building Materials*. Moscow, Research Institute of Construction Physics Publ., 1969. 142 p. (in Russian).
24. Blasi V. *Designer's Handbook. Construction Physics*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 535 p. (in Russian).
25. Kolesnikov P. A. *Heat-Protective Properties of Clothing*. Moscow, Legkaya industriya Publ., 1965. 345 p. (in Russian).