

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-66-79>

УДК 66.047.7

Исследование кинетики тепловлагообмена при термической обработке и сушке тонких влажных теплоизоляционных материалов

А. И. Ольшанский¹⁾, А. Н. Голубев¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Проведено исследование кинетики сушки тонких теплоизоляционных плоских материалов. Представлена аппроксимация кривой скорости сушки различными методами. При определении длительности сушки зональными методами использовалось уравнение скорости сушки с коэффициентом сушки. Изложены способы обработки опытных данных зональными методами А. В. Лыкова, В. В. Красникова и методом Б. С. Сажина. Уравнение, полученное обработкой опытных данных по методу Б. С. Сажина для определения длительности процесса сушки, содержит только величину влагосодержания прогрева материала, знать критическое влагосодержание нет необходимости. Приведены зависимости для вычисления коэффициента сушки зональными методами. По результатам эксперимента представлены формулы для установления длительности тепловой обработки теплоизоляционных материалов. Дана зависимость относительной скорости сушки от относительного влагосодержания. Обработка экспериментальных данных обобщенными комплексными переменными создает условия инвариантности, позволяющие переходить от одних переменных к другим, от одной системы координат к другой, что сокращает число экспериментов. Приведены формулы с комплексными переменными для определения длительности сушки материалов. На основании уравнения кинетики сушки А. В. Лыкова и уравнения Г. К. Филоненко для относительной скорости сушки представлены формулы для нахождения плотности тепловых потоков, интенсивности испарения влаги и температуры для периода падающей скорости сушки. Проанализированы решения экспериментальных уравнений. Установлена погрешность, вызываемая обработкой опытных данных. Представлена проверка достоверности полученных эмпирических уравнений и проведено сопоставление расчетных значений основных параметров кинетики сушки с экспериментом.

Ключевые слова: влагосодержание, коэффициент сушки, скорость сушки, интенсивность сушки, сушка теплоизоляционных материалов

Для цитирования: 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>

Адрес для переписки

Ольшанский Анатолий Иосифович
Витебский государственный
технологический университет
просп. Московский, 72,
220035, г. Витебск, Республика Беларусь
Тел.: +375 212 47-50-26
tm@vstu.by

Address for correspondence

Ol'shanskii Anatolii I.
Vitebsk State
Technological University
72, Moskovsky Ave.,
220035, Vitebsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 212 47-50-26
tm@vstu.by

Investigation of the Kinetics of Heat and Moisture Exchange during Heat Treatment and Drying of Thin Wet Thermal Insulation Materials

A. I. Ol'shanskii¹⁾, A. N. Golubev¹⁾

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

Abstract. The kinetics of drying of thin heat-insulating flat materials has been studied. The approximation of the drying rate curve by various methods is presented. When determining the duration of drying by zonal methods, the equation of the drying rate with the drying coefficient was used. The techniques of processing experimental data by zonal methods of A. V. Lykov, V. V. Krasnikov and by the method of B. S. Sazhin are described. The equation obtained by processing experimental data using the B. S. Sazhin method to determine the duration of the drying process contains only the amount of moisture content of the heating of the material, there is no need to know the critical moisture content. Dependences for calculating the drying coefficient by zonal methods are given. According to the results of the experiment, formulas for determining the duration of heat treatment of thermal insulation materials are presented. The dependence of the relative drying rate on the relative moisture content is presented as well. The processing of experimental data by generalized complex variables creates invariance conditions that allow moving from one variable to another, from one coordinate system to another, which reduces the number of experiments. Formulas with complex variables for determining the duration of drying of materials are given. Based on the drying kinetics equation by A. V. Lykov and the equation for the relative drying rate by G. K. Filonenko, equations are given for determining the density of heat fluxes, the intensity of moisture evaporation and temperature for the period of decreasing drying rate. Solutions of experimental equations are analyzed. The error caused by the processing of experimental data is established. Verification of the reliability of the empirical equations obtained is presented and comparison of the calculated values of the main parameters of the drying kinetics with the experiment is carried out.

Keywords: moisture content, drying coefficient, drying speed, drying intensity, drying of thermal insulation materials

For citation: 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. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (1), 66–79. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-66-79> (in Russian)

Введение

Сушка – процесс удаления влаги из твердых тел, связанный с высокими энергозатратами из-за большой теплоты парообразования. На испарение влаги из материала при температуре 90–150 °С расходуется в семь раз больше теплоты, чем на испарение воды. Возможность теоретического расчета длительности сушки влажных материалов в реальных условиях протекания процесса крайне ограничена [1–5]. В этом случае используют экспериментальные исследования с разработкой приближенных эмпирических уравнений для расчета кинетики сушки с минимальным числом постоянных, определяемых из опыта [1–6]. Наиболее эффективны методы обработки опытных данных, основанные на обобщенных переменных, характерных для сушки различных материалов.

Основная часть

Кинетика сушки. Исследование сушки конкретного материала начинается с построения кривых: сушки $\bar{u} = f(\tau)$, ее скорости $d\bar{u}/d\tau = f'(\bar{u})$ и температурных $\bar{t} = f(\tau)$, $\bar{t} = f(\bar{u})$, где \bar{u} и \bar{t} – влагосодержа-

ние и среднеинтегральная температура материала. Вид этих графических зависимостей определяется свойствами материала [1, 3, 5].

На рис. 1 показаны типичные для тонких плоских материалов кривая сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурные кривые $t_n = f(\tau)$, $\bar{t} = f(\tau)$, построенные для войлочной пластины, где t_n – температура на поверхности материала.

В общем случае выделяют два периода. На стадии прогрева $\tau_{пр}$ материал прогревается от начальной температуры t_n до постоянной температуры мокрого термометра $t_{м.т.}$, приближенно принимаемой t_n , в конце стадии прогрева влагосодержание материала $\bar{u}_{пр}$. Скорость сушки возрастает от нуля до скорости сушки в первом периоде N , где $N = d\bar{u}/d\tau = \text{const}$ и влагосодержание линейно уменьшается во времени τ . При сушке тонких материалов наблюдается период постоянной температуры на уровне $t_{м.т.}$, совпадающий с периодом постоянной скорости сушки до значения критического влагосодержания $\bar{u}_{кр}$ (рис. 1). Время сушки в первом периоде τ_1 .

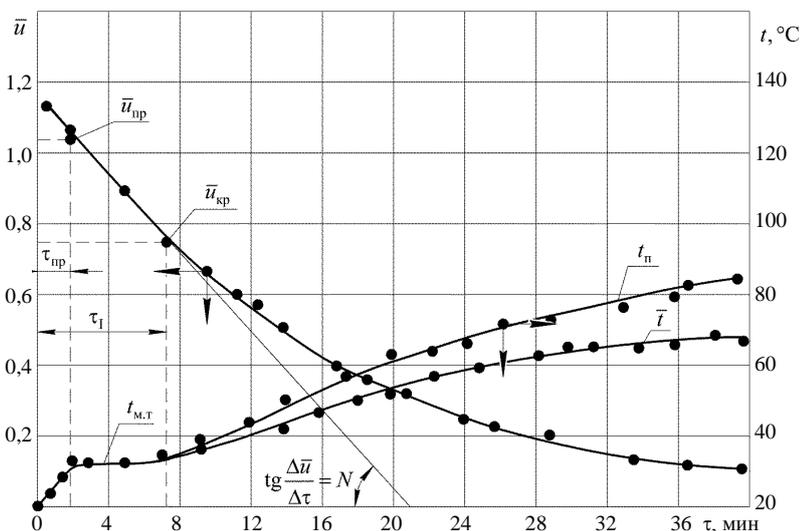


Рис. 1. Кривая сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурные кривые $t_n = f(\tau)$, $\bar{t} = f(\tau)$ в процессе сушки войлочной пластины (режим сушки: температура среды $t_c = 90^\circ\text{C}$; скорость воздуха $v = 5\text{ м/с}$; относительная влажность воздуха $\phi = 5\%$)

Fig. 1. Drying curve $\bar{u} = f(\tau)$ and temperature curves $t_n = f(\tau)$, and $\bar{t} = f(\tau)$ during felt plate drying process in drying mode: medium temperature $t_c = 90^\circ\text{C}$, air speed $v = 5\text{ m/s}$, relative humidity of the air $\phi = 5\%$

При достижении влагосодержания $\bar{u}_{кр}$ начинается второй период – падающей скорости сушки. Температура увеличивается от $t_{м.т.}$ до температуры среды t_c при длительности сушки $\tau \rightarrow \infty$. Кривая сушки асимптотически к концу процесса приближается к равновесному влагосодержанию u_p , сушку необходимо заканчивать при кондиционном значении $\bar{u}_{кон} > \bar{u}_p$ во избежание пересушки материала и перерасхода энергии [1, 2]. Исследованиями установлено, что кривая сушки во втором периоде представляет собой

две, а иногда и три сложные сопряженные кривые в точках с влаго-содержаниями $\bar{u}_{кр2}$ и $\bar{u}_{кр3}$ [1, 3].

К основным кинетическим параметрам относятся время и скорость сушки, температура материала, плотность тепловых потоков, интенсивность испарения влаги. Основная задача кинетики – определение длительности процесса [1–6], при этом аналитический путь очень сложен и не всегда возможен [1, 5].

Зависимость скорости сушки от влагосодержания $d\bar{u}/d\tau = f(\bar{u})$ во втором периоде имеет сложный вид. По классификации А. В. Лыкова [1–3, 5], для самых разнообразных материалов наблюдаются всего шесть типов кривых скорости сушки. В простейшем случае для расчета длительности сушки применяют линейную аппроксимацию кривой скорости сушки при постоянном коэффициенте $K = \text{const}$ по однозональному методу А. В. Лыкова [1–7].

На рис. 2 показаны кривая скорости сушки для войлочной пластины и ее аппроксимация однозональным методом А. В. Лыкова (I), двухзональным методом В. В. Красникова (II) и зональным методом (III) при переменном значении коэффициента K с заменой сложной кривой скорости сушки прямыми. При $\Delta\bar{u} \approx 0,1$ будет шесть зон, где 1–6 – зоны, в каждой из которых $K = \text{const}$.

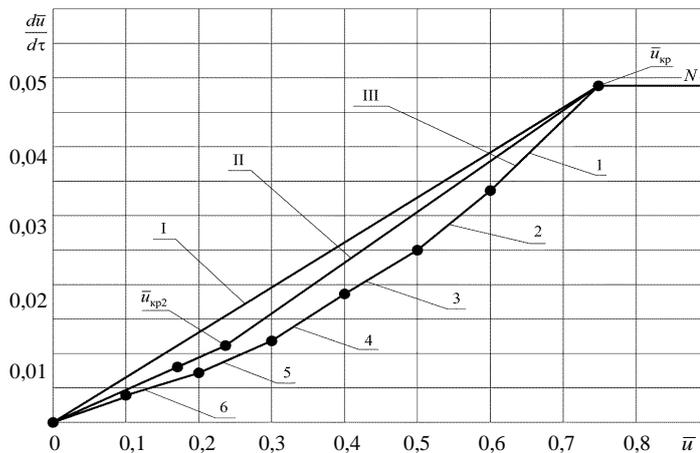


Рис. 2. Кривая скорости сушки $d\bar{u}/d\tau = f(\bar{u})$ войлочной пластины

(режим указан на рис. 1): I – аппроксимация методом А. В. Лыкова; II – методом В. В. Красникова; III – зональным методом; 1–6 – аппроксимация по зонам

Fig. 2. Curve of the drying rate $d\bar{u}/d\tau = f(\bar{u})$ in the process of drying the felt plate

(the drying mode is shown in Fig. 1): I – approximation by the method of A. V. Lykov; II – approximation by the method of V. V. Krasnikov; III – approximation by the zonal method; 1–6 – approximation by zones

Уравнение скорости сушки для однозонального метода (рис. 2, прямая I)

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| \approx K (\bar{u} - \bar{u}_p). \quad (1)$$

При интегрировании (1) при $K = \text{const}$ получим длительность сушки в периоде падающей скорости [1–3, 5]

$$\tau_{II} \approx -\frac{1}{K} \ln \left(\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right), \quad (2)$$

где \bar{u} – текущее влагосодержание материала; τ_{II} отсчитывается от нуля.

Длительность сушки с учетом времени в первом периоде по однозональному методу А. В. Лыкова

$$\tau \approx \tau_I + \tau_{II} = \frac{1}{N} \left[(\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}) - (\bar{u}_{кр} - u_p) \ln \left(\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right) \right]. \quad (3)$$

Коэффициент сушки K по однозональному методу [1–3, 5]

$$K \approx \frac{N}{\bar{u}_{кр} - u_p} = \text{const}. \quad (4)$$

Длительность сушки по двухзональному методу В. В. Красникова (рис. 2, ломаная II) определяется уравнением ($u_p = 0$)

$$\tau = \tau_I + \tau_{II} \approx \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}}{N} + \frac{1}{K_1} \ln \frac{\bar{u}_{кр1}}{\bar{u}_1} + \frac{1}{K_2} \ln \frac{\bar{u}_{кр2}}{\bar{u}_{II}}, \quad (5)$$

где \bar{u}_1 , \bar{u}_{II} – текущее влагосодержание соответственно в первой и второй части второго периода

$$\bar{u}_{кр2} < \bar{u}_1 < \bar{u}_{кр1}; \quad u_p < \bar{u}_{II} < \bar{u}_{кр2}.$$

Коэффициенты сушки K_1 , K_2 в первой и второй частях второго периода численно равны тангенсам углов наклона отрезков прямых к оси τ . Величина этих коэффициентов зависит от вида влажного тела и скорости сушки в первом периоде N .

В отличие от зональных методов расчета кривой скорости сушки, метод расчета кинетики сушки на основе единого кинетического уравнения, предложенный Б. С. Сажиным [4], позволяет описывать весь процесс, включая первый и второй периоды сушки [3, 4, 8, 9]. В его основу положено обобщенное уравнение массопередачи, которое применительно к конвективной сушке имеет вид [3, 4, 8, 9]

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| \approx K (\bar{u}_0 - \bar{u}) (\bar{u}_{пр} - u_p), \quad (6)$$

где K – эффективный коэффициент сушки.

Интегрирование (6) от начального влагосодержания \bar{u}_0 с учетом влагосодержания прогрева материала $\bar{u}_{пр}$ дает длительность сушки до заданного конечного влагосодержания [4]

$$\tau \approx \frac{\bar{u}_0}{K (\bar{u}_0 - u_p)} Z. \quad (7)$$

Параметр Z по методу Б. С. Сажина определяется выражением [4, 7]

$$Z = \ln \frac{(\bar{u}_0 - \bar{u})(\bar{u}_{\text{пр}} - u_p)}{(\bar{u}_0 - \bar{u}_{\text{пр}})(\bar{u} - u_p)}. \quad (8)$$

В системе координат $Z = f(\tau)$ кривые кинетики представляют собой прямые, угол наклона которых к оси абсцисс определяет эффективный коэффициент сушки K , а отрезки, отсекаемые по оси Z , равны $Z_0 = \bar{u}_{\text{пр}}$. Коэффициент сушки K равен тангенсу угла наклона прямых $Z = f(\tau)$ [4, 7]

$$\operatorname{tg} \psi = \ln \frac{Z - Z_0}{\tau} \approx K = \text{const.}$$

В реальных условиях K изменяется, поскольку кривая сушки представляет собой две или три сложные экспоненты, сопряженные в точках с влагосодержанием $\bar{u}_{\text{кр}2}$, $\bar{u}_{\text{кр}3}$. Закономерности изменения K вытекают из обобщенной кривой сушки, впервые построенной Г. К. Филоненко в системе координат $(\bar{u}_0 - u_p) = f(N\tau)$ [6]. При такой системе обработки опытных данных все кривые сушки при всех режимах сводятся в одну кривую. Комплекс $N\tau$ назван обобщенным временем сушки [1, 2]. В. В. Красниковым и Г. К. Филоненко [2, 6] на основе многих экспериментальных данных показано, что при начальном влагосодержании \bar{u}_0 при любом режиме сушки сохраняется неизменной величина $N\tau = \text{const}$. Из обобщенной кривой сушки следует уравнение для кривой скорости сушки [2, 6]

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = N^* N. \quad (9)$$

Следовательно, скорость сушки в любой момент второго периода можно определить по величине N для любого режима сушки и величине относительной скорости N^* [2]. Влияние режима сушки на K отражается величиной скорости в первом периоде N , которая является обобщенной переменной, устанавливающей влияние всех параметров на процесс. Относительная скорость сушки N^* не зависит от режима и для конкретного материала при данном методе является лишь функцией влагосодержания [1–3], что вытекает из метода обобщения кривых сушки Г. К. Филоненко [2–6]:

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

С целью установления действительной зависимости $N^* = f(\bar{u}/\bar{u}_{\text{кр}})$ проведено графическое дифференцирование более 20 кривых сушки для исследуемых материалов с анализом кривых скорости в широком диапазоне режимов ($t_c = 90\text{--}120$ °C; $v = 3, 5$ и 10 м/с). В результате получена зависимость, которая приближенно аппроксимируется уравнением

$$N^* \approx \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right)^{1,6}. \quad (10)$$

Все кривые скорости сушки для исследуемых материалов относятся к третьему типу кривых по классификации А. В. Лыкова [1–5] и обращены выпуклостью к оси τ (рис. 2). Это характерно для капиллярно-пористых материалов [1–4].

На основании (1), (9) и (10)

$$K \approx \frac{NN^*}{\bar{u} - u_p} \approx \frac{N(\bar{u}/\bar{u}_{кр})^{1,6}}{\bar{u} - u_p}. \quad (11)$$

Следовательно, в процессах сушки K является переменной величиной.

Кривую скорости сушки для войлочной пластины (рис. 2, линия III) разделим на несколько зон, для каждой из которых K является величиной постоянной, а влагосодержание изменяется по линейному закону. Таким образом, кривая скорости сушки заменяется одной ломаной линией со ступенчатыми прямыми на выбранных промежутках $\Delta\bar{u}$, с большей точностью аппроксимирующей действительную кривую скорости.

Подставим в (2) значения K из (11), тогда с учетом времени сушки в первом периоде длительность процесса при переменных K

$$\tau = \frac{1}{N} \left[(\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}) - \frac{\bar{u} - u_p}{N^*} \ln \left(\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right) \right], \quad (12)$$

где N^* найдем по (10).

Ключевым звеном при определении длительности сушки при интегрировании уравнения скорости (1) является коэффициент K .

Для однозонального метода относительная скорость сушки

$$N^* = \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p}. \quad (13)$$

В табл. 1 приведены результаты расчета длительности сушки зональными методами и методом Б. С. Сажина.

Таблица 1

Результаты расчета длительности сушки войлочной пластины разными методами аппроксимации кривой скорости сушки (рис. 2)

The results of calculating the duration of drying a felt plate using different methods for approximating the drying rate curve (Fig. 2)

Пластина шерстяного войлока: 135 × 100 × 8 мм; $\rho = 200 \text{ кг/м}^3$; $\bar{u}_0 = 1,14$; $\bar{u}_{кр} = 0,75$; $\bar{u}_p = 0$, $N = 0,054 \text{ мин}^{-1}$. Режим сушки: $t_c = 90 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 5 \text{ м/с}$; $\varphi = 6 \%$								
Влагосодержание	\bar{u}	0,60	0,50	0,40	0,30	0,25	0,20	0,10
	$\bar{u} / \bar{u}_{кр}$	0,80	0,67	0,53	0,40	0,33	0,27	0,14
Коэффициент сушки								
Однозональный метод А. В. Лыкова	K (4)	$K \approx \frac{N}{\bar{u}_{кр} - u_p} = \text{const}$; $K = 0,072 \text{ мин}^{-1}$; $\bar{u}_{кр} = 0,75$						

Продолжение табл. 1

Двухзональный метод В. В. Красникова	K_1, K_2 (5)	$K_1 = 0,065 \text{ мин}^{-1}; K_2 = 0,115 \text{ мин}^{-1}; \bar{u}_{\text{кр}1} = 0,75; \bar{u}_{\text{кр}2} = 0,23$						
Метод Б. С. Сажина	K (6)	$K = \text{const}; K = 0,115 \text{ мин}^{-1}; \bar{u}_{\text{кр}} = 0,75$						
Зональный метод	$K = \text{var}$ (11)	0,063	0,054	0,047	0,038	0,024	0,023	0,022
Относительная скорость сушки								
$N^* = \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{\text{кр}} - u_p}$	(13)	0,80	0,67	0,53	0,40	0,33	0,27	0,14
$N_{\text{экс}}^* = \left(\frac{\bar{u}}{u_{\text{кр}}} \right)^{1,6}$	(10)	0,700	0,526	0,362	0,231	0,169	0,124	0,045
Длительность сушки τ , мин								
Однозональный метод А. В. Лыкова	(3)	11,9	14,2	16,8	21,2	23,5	27,6	37,8
Двухзональный метод В. В. Красникова	(5)	11,4	13,3	17,4	21,6	24,6	28,4	38,7
Метод Б. С. Сажина	(7)	11,2	13,3	16,8	21,6	23,5	26,8	38,2
Зональный метод	(12)	12,8	13,3	16,5	20,5	24,5	28,8	38,2
Эксперимент	–	12,5	13,5	16,5	20,5	25,0	28,5	38,0

Анализ расчетов времени сушки, представленных в табл. 1, показал следующее: по однозональному методу А. В. Лыкова (рис. 2, прямая I) погрешность в расчетах 7–10 %; по двухзональному методу В. В. Красникова (рис. 2, ломаная II) – 6–8 %; по зональному методу (рис. 2, линия III) – 4–5 %; по методу Б. С. Сажина – 5–7 %. Таким образом, более точным является метод при переменных значениях коэффициента сушки K .

Обобщенные комплексные переменные. К обобщенным переменным сушки относятся: $N\tau$ – обобщенное время сушки, $\tau_{\text{II}}/\tau_{\text{I}}$ – относительное время сушки, $\bar{u}/\bar{u}_{\text{кр}}$ – относительное влагосодержание, N^* – относительная скорость сушки [1–2]. Обработка опытных данных комплексными переменными создает условия инвариантности, позволяющие переходить от одних переменных к другим, от одной системы координат к другой, что значительно сокращает число экспериментов [2, 10–12]. Использование комплекса $N\tau$ придает исследованию сушки обобщенный характер, когда анализируется не единичный частный случай, а множество подобных совокупностей [2, 3].

На рис. 3 даны зависимости $N\tau_{\text{II}} = f\left(\bar{u}/\bar{u}_{\text{кр}}\right)$ для периода падающей скорости в процессах сушки керамики, войлока и асбеста при различных режимах.

В результате обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов получено уравнение [10, 11]

$$N\tau_{\text{II}} = \beta \exp\left(-2,2 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}}\right). \quad (14)$$

Длительность сушки с учетом времени в первом периоде

$$\tau \approx \tau_I + \tau_{II} \approx \frac{1}{N} \left[(\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}) + \beta \exp \left(-2,2 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right) \right]. \quad (15)$$

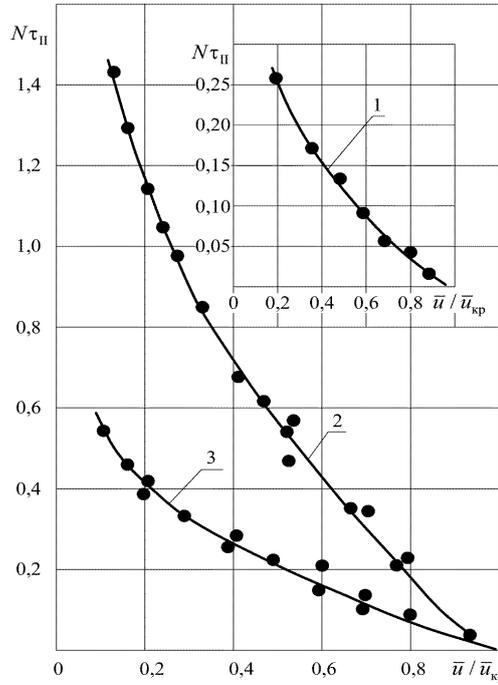


Рис. 3. Зависимость $N\tau_{II} = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$ для процессов сушки: 1 – керамики; 2 – войлока; 3 – асбеста; режим сушки: $t_c = 90, 120 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 3, 5, 10 \text{ м/с}$

Fig. 3. Dependence of the generalized drying time $N\tau_{II} = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$ for the processes of drying: 1 – ceramics, 2 – felt; 3 – asbestos; drying modes are: $t_c = 90, 120 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 3, 5, 10 \text{ m/s}$

Коэффициент β для исследуемых материалов дан в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов β, A, A_1 в уравнениях (14), (16), (17) в процессах сушки исследуемых материалов
The magnitudes of the coefficient β, A_1 and A in equations (14), (16), (17) in the processes of drying of the materials under study

Наименование материала	β (14)	A (16)	A_1 (17)
Керамическая плитка	0,36	$\frac{1}{0,55 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} + 0,19}$	$0,70 - 0,10 \frac{\bar{u}_0}{\bar{u}_{кр}}$
Листовой асбест	1,76	$\frac{1}{0,39 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} + 0,18}$	$0,50 - 0,10 \frac{\bar{u}_0}{\bar{u}_{кр}}$
Шерстяной войлок	0,65	$\frac{1}{0,32 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} + 0,14}$	$0,75 - 0,10 \frac{\bar{u}_0}{\bar{u}_{кр}}$

На рис. 4 представлена обработка опытных данных для $\tau_{II}/\tau_I = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$ в процессах сушки керамики, асбеста и войлока при различных режимах в виде экспоненциальной и степенной зависимостей [13–16]:

$$\frac{\tau_{II}}{\tau_I} \approx A \exp\left(-2 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right); \quad (16)$$

$$\frac{\tau_{II}}{\tau_I} \approx A_1 \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right)^{-1,25}, \quad (17)$$

где коэффициенты A , A_1 – нелинейные функции отношений соответственно $\bar{u}/\bar{u}_{кр}$ и $\bar{u}_0/\bar{u}_{кр}$ (рис. 5).

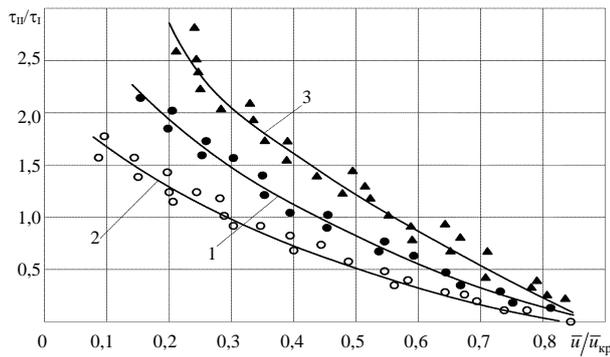


Рис. 4. Зависимость $\tau_{II}/\tau_I = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$ в процессах сушки:

1 – керамики; 2 – асбеста; 3 – войлока (режимы указаны на рис. 3)

Fig. 4. Dependence $\tau_{II}/\tau_I = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$ in the processes of drying:

1 – ceramics; 2 – asbestos; 3 – felt (drying modes are given in Fig. 3)

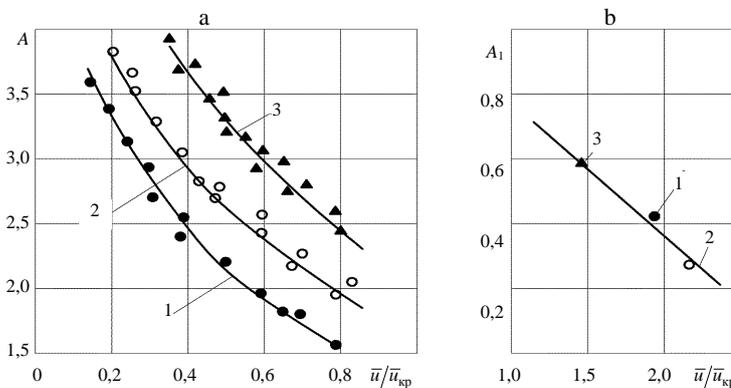


Рис. 5. Зависимость коэффициентов $A = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$ (а), $A_1 = f(\bar{u}_0/\bar{u}_{кр})$ (б) для сушки:

1 – керамики; 2 – асбеста; 3 – войлока (режимы указаны на рис. 3)

Fig. 5. Dependence of coefficients $A = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$ (а), $A_1 = f(\bar{u}_0/\bar{u}_{кр})$ (б) for drying of:

1 – ceramics; 2 – asbestos; 3 – felt (drying modes are given in Fig. 3)

Коэффициент A_1 в первом приближении вычисляется по зависимости $A_1 \approx 1,2 - 0,38 \frac{\bar{u}_0}{\bar{u}_{кр}}$. Более точные уравнения для определения коэффициентов A , A_1 даны в табл. 2.

Тогда уравнение (15) с учетом (16), (17) примет вид

$$\tau \approx \tau_I + \tau_{II} \approx \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}}{N} \left[1 + A \exp \left(-2 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right) \right]; \quad (18)$$

$$\tau \approx \tau_I + \tau_{II} \approx \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}}{N} \left[1 + A_1 \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{-1,25} \right]. \quad (19)$$

Основное уравнение кинетики сушки А. В. Лыкова [1, 3, 8]

$$\frac{q_{II}}{q_I} = N^* (1 + Rb), \quad (20)$$

где q_I , q_{II} – плотность потока теплоты соответственно в первом и втором периодах.

При сушке тонких материалов расход теплоты на нагревание влажного тела значительно меньше, чем на испарение из него влаги, и число Ребиндера $Rb \ll 1$ [1, 2]. Пренебрегая числом Ребиндера при малых его значениях [1, 8], для плотности потока теплоты во втором периоде запишем

$$q_{II} = q_I N^*.$$

На основании (10) получим

$$q_{II} \approx q_I \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1,6} = r \rho R_v N \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1,6}, \quad (21)$$

где $q_I = r \rho R_v N$; r – теплота парообразования; ρ – плотность; R_v – отношение объема тела к поверхности.

Интенсивность испарения влаги в периоде постоянной скорости сушки [1–4]

$$j_I = \rho R_v N, \quad (22)$$

а в периоде падающей скорости

$$j_{II} = \frac{q_{II}}{r} \approx \frac{q_I \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1,6}}{r} = \rho R_v N \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1,6}. \quad (23)$$

Г. К. Филоненко на основании обобщенной кривой сушки (9) получил зависимость, устанавливающую связь влагообмена с теплообменом [6]:

$$N^* \approx \frac{t_c - t_{II}}{t_c - t_{м.т}}. \quad (24)$$

Температура на поверхности материала вычисляется по формуле

$$t_{II} = t_c - (t_c - t_{м.т}) N^* = t_c - (t_c - t_{м.т}) \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1,6}. \quad (25)$$

В табл. 3 приведены результаты расчетов основных параметров сушки по полученным уравнениям и сравнение расчетных значений с экспериментом.

Таблица 3

Результаты расчета основных параметров кинематики сушки по полученным уравнениям и их сравнение с экспериментальными значениями
The results of calculating the main parameters of the kinematics of drying according to the obtained equations and comparing the calculated values with the experimental ones

Влаго- содер- жание \bar{u}	Относитель- ное влаго- содержание $\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}$	Длительность сушки τ , мин						Температура поверхности $t_{пр}$, °C		Плотность потока теплоты во втором периоде q_{II} , Вт/м ²	Интенсивность испарения влаги в периоде падающей скорости j_{II} , 10 ³ кг/м ² с
		(экс)	(7)	(12)	(15)	(18)	(19)	(экс)	(25)		
Керамическая плитка: 120×78×5 мм; $\rho = 1860 \text{ кг/м}^3$; $\bar{u}_0 = 0,2$; $\bar{u}_{кр} = 0,1$; режим сушки: $t_c = 120 \text{ °C}$; $v = 5 \text{ м/с}$; $\varphi = 5 \%$; $N = 0,025 \text{ мин}^{-1}$; $t_{м.т} = 48,5 \text{ °C}$; $\tau_1 = 4 \text{ мин}$; $q_I = 7200 \text{ Вт/м}^2$; $j_I = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^2\text{с}$											
0,08	0,8	6,5	7,2	6,4	6,1	7,1	6,8	65,0	64,0	6380	2,66
0,06	0,6	8,5	8,6	8,3	8,9	8,4	8,8	75,0	73,5	4770	1,98
0,04	0,4	11,5	11,3	11,4	12,2	11,2	11,8	83,0	85,2	9260	1,37
0,02	0,2	16,5	17,2	16,5	15,9	18,6	17,2	92,0	90,5	1690	0,71
Листовой асбест: 120×80×6 мм; $\rho = 770 \text{ кг/м}^3$; $\bar{u}_0 = 0,46$; $\bar{u}_{кр} = 0,21$; режим сушки: $t_c = 120 \text{ °C}$; $v = 5 \text{ м/с}$; $\varphi = 5 \%$; $N = 0,028 \text{ мин}^{-1}$; $t_{м.т} = 37 \text{ °C}$; $\tau_1 = 7,5 \text{ мин}$; $q_I = 4840 \text{ Вт/м}^2$; $j_I = 2,15 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^2\text{с}$											
0,16	0,8	11,5	11,2	11,4	11,3	11,4	11,2	55,0	57,0	3860	1,61
0,14	0,7	12,5	12,4	12,5	12,2	12,8	12,3	59,0	61,2	3420	1,42
0,12	0,6	14,5	15,3	14,5	14,2	13,9	14,2	65,0	67,2	2830	1,18
0,08	0,4	18,5	20,5	18,4	18,3	19,2	19,2	76,0	79,4	1890	0,79
0,04	0,2	24,5	25,6	23,8	26,9	25,7	25,4	85,0	80,7	1050	0,40
0,02	0,1	29,0	29,8	28,7	31,4	32,3	30,8	98,0	101	680	0,26
Шерстяной войлок: 135×100×8 мм; $\rho = 220 \text{ кг/м}^3$; $\bar{u}_0 = 1,14$; $\bar{u}_{кр} = 0,75$; режим сушки: $t_c = 90 \text{ °C}$; $v = 5 \text{ м/с}$; $\varphi = 5 \%$; $N = 0,054 \text{ мин}^{-1}$; $t_{м.т} = 34 \text{ °C}$; $\tau_1 = 7,5 \text{ мин}$; $q_I = 3350 \text{ Вт/м}^2$; $j_I = 1,38 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^2\text{с}$											
0,60	0,80	12,5	11,2	12,8	12,4	12,1	11,8	41,0	40,8	2650	1,07
0,50	0,66	13,5	13,2	13,3	14,2	14,2	13,2	43,0	42,2	2150	0,89
0,40	0,53	16,5	16,8	16,5	16,2	16,2	16,7	46,0	45,7	1810	0,75
0,30	0,40	20,5	21,6	20,5	19,5	21,3	21,4	51,0	50,0	1440	0,61
0,20	0,26	28,5	26,8	28,8	27,6	30,2	28,5	58,0	57,6	840	0,34

ВЫВОДЫ

1. Проведено исследование кинетики сушки тонких теплоизоляционных плоских материалов. Рассмотрены способы обработки опытных данных обобщенными комплексными переменными и методы расчета длительно-

сти сушки. Установлены закономерности сушки теплоизоляционных материалов и даны уравнения для расчета всех ее кинетических параметров. В результате обработки эксперимента различными методами установлено, что коэффициент сушки в периоде падающей скорости является величиной переменной.

2. Проведена проверка достоверности полученных расчетных значений параметров в сравнении с экспериментом. Длительность сушки при переменных значениях коэффициента сушки определена с большей точностью по сравнению с однозональным методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 472 с.
2. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. М.: Энергия, 1973. 288 с.
3. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. Минск: Беларус. наука, 2010. 443 с.
4. Сажин, Б. С. Научные основы техники сушки / Б. С. Сажин. М.: Наука, 1997. 447 с.
5. Рудобашта, С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. М.: Химия, 1980. 248 с.
6. Филоненко, Г. К. Сушильные установки / Г. К. Филоненко, П. Д. Лебедев. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1952. 263 с.
7. Лыков, А. В. Кинетика теплообмена в процессе сушки влажных материалов / А. В. Лыков, П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 1972. Т. 23, № 3. С. 401–406.
8. Ольшанский, А. И. Кинетика тепловлагообмена и метод расчета длительности конвективной сушки натуральной кожи / А. И. Ольшанский, А. Л. Климентьев // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2020. Т. 65, № 4. С. 464–475. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-464-475>.
9. Куц, П. С. Некоторые закономерности тепловлагообмена и приближенные методы расчета кинематики процесса сушки влажных материалов / П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 1977. Т. 32, № 5. С. 1007–1014.
10. Ольшанский, А. И. Экспериментальное исследование кинетики сушки тонких плоских влажных материалов методом регулярного режима с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский, А. М. Гусаров // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90, № 3. С. 700–713.
11. Ольшанский, А. И. Регулярный тепловой режим нагревания влажных плоских капиллярно-пористых материалов в процессе сушки / А. И. Ольшанский, В. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87, № 6. С. 1308–1318.
12. Ольшанский, А. И. Исследование теплообмена в процессе сушки влажных материалов по экспериментальным данным влагообмена с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87, № 4. С. 887–897.
13. Ольшанский, А. И. Экспериментальные исследования тепловлагообмена в процессе конвективной сушки тонких влажных материалов / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 6. С. 564–578. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-564-578>.
14. Ольшанский, А. И. Исследование теплообмена в процессе сушки методом регулярного режима / А. И. Ольшанский, В. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 2012. Т. 85, № 2. С. 385–391.
15. Ольшанский, А. И. Исследование тепломассообмена в процессах тепловой обработки и сушки теплоизоляционных материалов / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 2. С. 156–168. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-156-168>.

16. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. 535 с.

Поступила 09.04.2022 Подписана в печать 14.06.2022 Опубликована онлайн 31.01.2023

REFERENCES

1. Lykov A. V. (1968) *Theory of Drying*. Moscow, Energiya Publ. 472 (in Russian).
2. Krasnikov V. V. (1973) *Conductive Drying*. Moscow, Energiya Publ. 288 (in Russian).
3. Akulich P. V. (2010) *Calculations of Drying and Heat Exchange Installations*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 443 (in Russian).
4. Sazhin B. S. (1997) *Scientific Fundamentals of Drying Techniques*. Moscow, Nauka Publ. 447 (in Russian).
5. Rudobashta S. P. (1980) *Mass Transfer in Systems with a Solid Phase*. Moscow, Khimiya Publ. 248 (in Russian).
6. Filonenko G. K., Lebedev P. D. (1952) *Dryers*. Moscow – Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 263 (in Russian).
7. Lykov A. V., Kuts P. S., Olshanskii A. I. (1972) Kinetics of Heat Transfer in the Process of Drying Wet Materials. *Journal of Engineering Physics*, 23 (3), 1082–1086. <https://doi.org/10.1007/bf00832214>.
8. Alshansky A. I., Klimentyev A. L. (2020) Kinetics of Heat and Moisture Exchange and Method for Calculating the Duration of the Convective Drying Process of Natural Leather. *Vestsi Natsyyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, 65 (4), 464–475. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-464-475> (in Russian).
9. Kutz 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>.
10. Ol'shanskii A. I., Gusarov A. M. (2017) Experimental Study of the Kinetics of Drying Thin Flat Moist Materials by the Regular-Regime Method Using Generalized Complex Variables. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 90 (3), 665–678. <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1614-x>.
11. Ol'shanskii A. I. (2014) Regular Heat Regime of Heating of Moist Capillary-Porous Materials in the Process of Their Drying. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 87 (6), 1362–1373. <https://doi.org/10.1007/s10891-014-1139-5>.
12. Ol'shanskii A. I. (2014) Study of the Heat Transfer in the Process of Drying of Moist Materials from Experimental Data on Moisture Transfer. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 87 (4), 917–928. <https://doi.org/10.1007/s10891-014-1089-y>.
13. Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V., Gusarov A. M. (2018) Experimental Studies of Heat and Moisture Exchange in the Process of Convective Drying of Thin Wet Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 564–578. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-564-578> (in Russian).
14. Ol'shanskii A. I., Ol'shanskii V. I. (2012) Investigation of Heat Transfer in the Drying Process by the Method of Regular Regime. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 85 (2), 415–422. <https://doi.org/10.1007/s10891-012-0667-0>.
15. Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V., Gusarov A. M. (2022) Investigation of Heat and Mass Transfer in the Processes of Heat Treatment and Drying of Thermal Insulation Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (2), 156–168. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-156-168> (in Russian).
16. Lykov A. V., Mikhailov Yu. A. (1963) *Theory of Heat and Mass Transfer*. Moscow – Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 535 (in Russian).

Received: 9 April 2022

Accepted: 14 June 2022

Published online: 31 January 2023