

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-156-168>

УДК 66.047.7

Исследование тепломассообмена в процессах тепловой обработки и сушки теплоизоляционных материалов

А. И. Ольшанский¹⁾, С. В. Жерносек¹⁾, А. М. Гусаров¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Изложены результаты исследования тепло- и массопереноса в процессах тепловой обработки и сушки теплоизоляционных материалов при значениях теплообменного критерия Био меньше единицы, когда основным фактором является взаимодействие поверхности испарения материала с окружающей средой (внешняя задача). Принималось, что при малых градиентах температуры по сечению влажного тела термическим переносом вещества можно пренебречь, а фазовые превращения отсутствуют (критерий Поснова равен нулю). В результате обработки опытных данных по конвективной тепловой обработке материалов, проведенной методом наименьших квадратов, получены экспериментальные уравнения для расчета кинетики сушки. Приведены уравнения для определения длительности сушки, температуры материала, плотности тепловых потоков. На основе теории регулярного теплового режима получены уравнения для темпа нагрева твердого тела и темпа убыли влагосодержания. Представлены проверка достоверности полученных уравнений и сопоставление расчетных значений параметров с экспериментальными. Установлена экспериментальная зависимость относительной скорости сушки от безразмерного влагосодержания. Приведена зависимость обобщенного времени сушки от относительного влагосодержания. На основе анализа опытных данных по коэффициентам теплопроводности для влажных теплоизоляционных материалов установлены зависимости коэффициентов теплопроводности от влагосодержания и температуры. В результате решения критериального уравнения теплообмена получены значения коэффициентов теплоотдачи для периода падающей скорости сушки. Определены значения критерия Био в процессах сушки пористой керамики и асбеста. Установлено, что отношение темпа убыли влагосодержания к скорости сушки в первом периоде не зависит от режима сушки и является функцией начального влагосодержания.

Ключевые слова: влагосодержание, скорость сушки, коэффициент сушки, температура мокрого термометра, коэффициент теплообмена, число Био, темп нагрева тела

Для цитирования: 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>

Адрес для переписки

Ольшанский Анатолий Иосифович
Витебский государственный
технологический университет
просп. Московский, 72,
210038, г. Витебск, Республика Беларусь
Тел.: +375 21 247-50-26
tiomp@vstu.by

Address for correspondence

Ol'shanskii Anatolii I.
Vitebsk State
University of Technology
72, Moskow Ave.,
210038, Vitebsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 21 247-50-26
tiomp@vstu.by

Investigation of Heat and Mass Transfer in the Processes of Heat Treatment and Drying of Thermal Insulation Materials

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

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

Abstract. The results of the study of heat and mass transfer in the processes of heat treatment and drying processes of thermal insulating materials when the values of the Biot heat exchange criterion are less than one and the main factor is the interaction of the evaporation surface of the material with the environment (external problem) are presented. It was assumed that at low temperature gradients over the cross section of a wet body, thermal transfer of matter can be neglected, and phase transformations are absent (Posnov's criterion is equal to zero). By processing the experimental data on convective heat treatment of materials carried out by the least squares method, experimental equations for calculating the kinetics of drying have been obtained. Equations are given for determining the duration of drying, material temperature, heat flux density. On the basis of the theory of regular thermal regime, equations for the rate of heating of a solid and the rate of decrease in moisture content have been obtained. The verification of the reliability of the obtained equations and comparison of the calculated values of the parameters with the experimental ones are presented. An experimental dependence of the relative drying rate on the dimensionless moisture content has been established. The dependence of the generalized drying time on the relative moisture content is given. Also, based on the analysis of the experimental data on the thermal conductivity coefficients for wet thermal insulation materials, the dependences of the thermal conductivity coefficients on moisture content and temperature have been established. As a result of solving the criterion heat transfer equation, the values of the heat transfer coefficients for the period of the decreasing drying rate are obtained. The values of the Biot criterion in the processes of drying porous ceramics and asbestos are determined, too. It has been determined that the ratio of the moisture content loss rate to the drying rate in the first period does not depend on the drying mode and is a function of the initial moisture content.

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

For citation: 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. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (2), 156–168. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-156-168> (in Russian)

Введение

Тепловая обработка влажных материалов – один из самых энергоёмких процессов. При его проведении теплота парообразования составляет 2200–2500 кДж/кг при атмосферном давлении и температуре теплоносителя 90–150 °С. Соответственно выбор теплового режима и типа аппарата для сушки конкретного материала влияет на энергоэффективность работы установки, расход энергии на тепловую обработку и качество обрабатываемого материала [1–4]. Поэтому, наряду с аналитическими, необходимы экспериментальные исследования по теплообмену, основанные на наиболее общих закономерностях протекания теплового процесса.

Постановка задачи. Основными характеристиками тепловой обработки и сушки влажных материалов, влияющими на качество обрабатываемо-

го продукта, являются длительность процесса, температура материала, плотность тепловых потоков, интенсивность тепломассообмена. Все необходимые расчетные кинетические зависимости могут быть получены из дифференциальных уравнений тепломассообмена. Однако такая задача сложна, а получить точное аналитическое решение достаточно трудно. Поэтому необходимы экспериментальные исследования для разработки простых, надежных опытных уравнений с минимальным количеством констант, определяемых экспериментально [2–5].

Кинетика тепловой обработки и сушки материалов

В процессе сушки тонких влажных материалов теплообменный критерий Био меньше единицы ($Bi < 1$), и при малых градиентах температуры по сечению тонкого влажного тела термическим переносом вещества можно пренебречь (критерий Писнона $Pr = 0$) [2, 4, 6]. В отсутствие термического переноса вещества интенсифицируется диффузионный перенос влаги к поверхности материала, и лимитирующим фактором является внешний тепломассообмен поверхности материала с внешней средой [2, 4]. В этом случае интенсифицировать внешний тепломассообмен можно за счет активизации гидродинамического режима в аппарате, если не нарушается технологический процесс [3].

На рис. 1 представлены зависимости среднего влагосодержания \bar{u} от времени сушки τ (рис. 1а) и среднеинтегральной температуры \bar{t} от среднего влагосодержания материала (рис. 1б) в процессах сушки листового асбеста и керамики, образующие кривые сушки и температурные кривые.

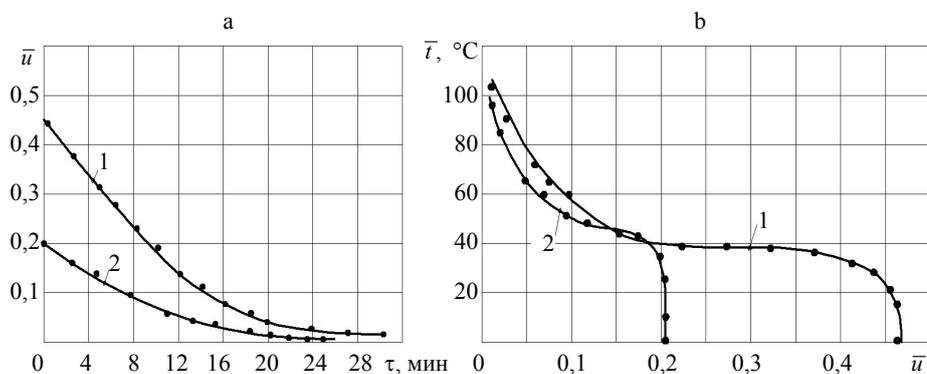


Рис. 1. Кривые сушки $\bar{u} = f(\tau)$ (а) и температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ (б) при тепловой обработке и сушке:

- 1 – листового асбеста (режим сушки: температура среды $t_c = 120$ °С; скорость воздуха $v = 5$ м/с; относительная влажность воздуха $\phi = 5$ %);
- 2 – пористой керамики ($t_c = 120$ °С; $v = 3$ м/с; $\phi = 5$ %)

Fig. 1. Curves of drying $\bar{u} = f(\tau)$ (a) and temperature curves $\bar{t} = f(\bar{u})$ (b) for heat treatment and drying of: 1 – asbestos sheets (drying modes: ambient temperature $t_c = 120$ °С; air speed $v = 5$ m/s; relative humidity $\phi = 5$ %); 2 – porous ceramics ($t_c = 120$ °С; $v = 3$ m/s; $\phi = 5$ %)

Тепловая обработка тонких влажных материалов протекает с наличием периодов постоянной и падающей скорости сушки (первый период) и постоянной температуры на уровне температуры мокрого термометра $\bar{t}_{м.т.}$. Периоды совпадают до значения критического влагосодержания $\bar{u}_{кр.}$, а при $\bar{u} < \bar{u}_{кр.}$ начинается второй период с $\bar{t} > \bar{t}_{м.т.}$, протекающий в условиях регулярного теплового режима [2–5].

Тепломассообмен при тепловой обработке и сушке материалов и вывод расчетных уравнений

Термическая обработка и сушка влажных материалов – это нестационарные процессы тепло- и массопереноса. В случае нагревания тонкого плоского влажного тела, когда теплообменный критерий $Bi \ll 1$, а начальное распределение температуры внутри тела равномерное, между поверхностями пластины теплообмен с окружающей средой происходит по закону Ньютона. Градиент температуры в середине пластины равен нулю, и вместо уравнения теплопроводности Фурье можно воспользоваться балансовым уравнением теплоты, Вт/м² [6–8]:

$$c_{вл}\rho R_V \frac{d\bar{t}}{d\tau} = \bar{\alpha}(t_c - \bar{t}), \quad (1)$$

где $c_{вл}$ – средняя удельная теплоемкость влажного тела, Дж/(кг·°C); ρ – плотность материала, кг/м³; $R_V = V/F$ – отношение объема тела к площади поверхности, м; $\frac{d\bar{t}}{d\tau}$ – скорость нагрева тела, °C/с; \bar{t} – среднеинтегральная температура, °C; $\bar{\alpha}$ – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C); t_c – температура среды, °C.

Интегрированием (1) получим для второго периода сушки [7]

$$\frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{м.т.}} = \exp\left(-\frac{\bar{\alpha}}{c_{вл}\rho R_V} \tau_{II}\right), \quad (2)$$

где τ_{II} – время сушки во втором периоде, отсчитываемое от нуля, мин.

Комплекс $\frac{\bar{\alpha}}{c_{вл}\rho R_V}$ при $Bi \ll 1$ представляет собой темп нагрева влажного тела m_t [6, 9, 10].

Средняя удельная теплоемкость многих твердых тел почти не зависит от температуры и для влажных материалов определяется уравнением

$$c_{вл} = c_o + c_b \bar{u},$$

где c_o – удельная теплоемкость сухого тела, Дж/(кг·°C); c_b – теплоемкость воды, Дж/(кг·°C).

Плотность теплового потока во втором периоде, Вт/м² [7]:

$$q_{II} = c_{вл}\rho R_V \frac{d\bar{t}}{d\tau}. \quad (3)$$

Дифференцируя решение (2) и подставляя результат в (3), получим

$$\frac{q_{II}}{\bar{\alpha}_{кр}(t_c - t_{м.т})} = \exp\left(-\frac{\bar{\alpha}}{c_b \rho R_V} \tau_{II}\right), \quad (4)$$

где $\bar{\alpha}_{кр}$ – коэффициент теплоотдачи в первом периоде.

Запишем (4) в виде

$$\frac{q_{II}}{q_I} = \frac{\bar{\alpha}(t_c - \bar{t})}{\bar{\alpha}_{кр}(t_c - t_{м.т})} = \exp(-m_t \tau_{II}), \quad (5)$$

где q_I , q_{II} – плотность теплового потока в первом и втором периодах тепловой обработки.

Основное уравнение кинетики сушки А. В. Лыкова [11–14] представим как

$$\frac{q_{II}}{q_I} = \frac{\bar{\alpha}(t_c - \bar{t})}{\bar{\alpha}_{кр}(t_c - t_{м.т})} = N^* (1 + Rb), \quad (6)$$

где N^* – относительная скорость сушки; Rb – число Ребиндера.

При конвективном подводе теплоты к влажному тонкому телу ее расход на нагревание материала значительно меньше, чем на испарение из него влаги, и $Rb \ll 1$. В первом периоде $Rb = 0$. Если пренебречь малыми значениями числа Ребиндера, из (5) и (6) следует

$$\frac{q_{II}}{q_I} \approx N^* \approx \exp(-m_t \tau_{II}). \quad (7)$$

Относительная скорость сушки N^* не зависит от режима тепловой обработки и для каждого конкретного материала является только функцией влагосодержания [2, 12]. В результате обработки экспериментальных данных по тепловой обработке пористой керамики и листового асбеста для зависимости $N^* = f(\bar{u} / u_{кр})$, изображенной на рис. 2, получим:

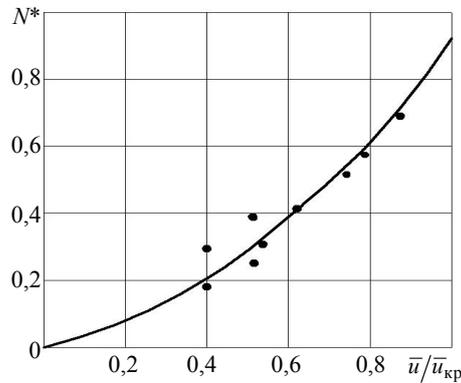
$$N^* \approx 0,2 \exp\left(1,5 \frac{\bar{u}}{u_{кр}}\right) \text{ или } N^* \approx \left(\frac{\bar{u}}{u_{кр}}\right)^{1,6}. \quad (8)$$

Среднеинтегральная температура материала для периода убывающей скорости может быть приближенно вычислена через отношение времени по периодам τ_{II}/τ_I . В результате обработки экспериментальных данных по конвективной сушке для исследуемых материалов получено приближенное уравнение [9, 10]

$$\frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{м.т}} = \exp\left(-\beta \frac{\tau_{II}}{\tau_I}\right), \quad (9)$$

где β – коэффициент, определяемый опытным путем.

Рис. 2. Зависимость $N^* = f(\bar{u}/u_{кр})$ для тепловой обработки и сушки пористой керамики и листового асбеста ($t_c = 90, 120\text{ }^\circ\text{C}$; $v = 3, 5, 10\text{ м/с}$; $\varphi = 5\%$)
 Fig. 2. Dependence $N^* = f(\bar{u}/u_{кр})$ of heat treatment and drying porous ceramics and sheet asbestos ($t_c = 90, 120\text{ }^\circ\text{C}$; $v = 3, 5, 10\text{ м/с}$; $\varphi = 5\%$)



Подставляя время сушки в первом периоде, получим

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{м.т}) \exp\left(-\beta N \frac{\tau_{II}}{\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}}\right), \quad (10)$$

где N – скорость сушки в первом периоде, мин^{-1} .

В (10) для керамики и листового асбеста $\beta \approx 0,040$, для шерстяного войлока $\beta \approx 0,135$.

На основании полной системы дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса для частного случая при отсутствии в материале термического переноса вещества и фазовых превращений посредством предельного перехода ($Pn = 0$) А. В. Лыковым [6] дано решение для относительных температур и влагосодержания:

$$\frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_n} = f(-Bi\,Fo); \quad (11)$$

$$\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_0 - u_p} = f(-Bi_m\,Fo_m), \quad (12)$$

где t_n – начальная температура материала, $^\circ\text{C}$; u_p – равновесное влагосодержание; Bi , Bi_m , Fo , Fo_m – тепло- и массообменные критерии Био и Фурье.

Комплексы критериев $Bi\,Fo$, $Bi_m\,Fo_m$ – это функции соответственно $m_i\tau_{II}$, $m_u\tau$ [5, 8, 9, 13]. Темп убыли влагосодержания m_u является сложной функцией режима сушки начального влагосодержания \bar{u}_0 , скорости сушки в первом периоде N и ряда других факторов, влияющих на процесс.

Обработкой опытных данных по сушке пористой керамики, листового асбеста, шерстяного войлока, технического картона, натуральной кожи при различных режимах сушки для зависимости $m_u/N = f(\bar{u}_0)$, изображенной на рис. 3, получена приближенная зависимость, которая аппроксимируется уравнением [9, 10]

$$m_u \approx 8,7N \exp(2\bar{u}_0). \quad (13)$$

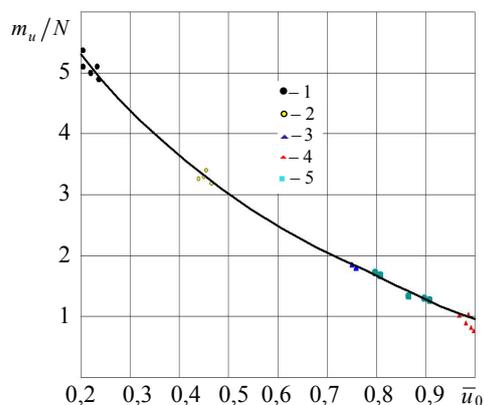


Рис. 3. Зависимость комплекса m_u/N от начального влагосодержания материала \bar{u}_0 для процессов тепловой обработки и сушки: 1 – керамики (режим сушки: $t_c = 90, 120$ °С; $v = 3, 5$ м/с); 2 – листового асбеста ($t_c = 90, 120$ °С; $v = 3, 5, 10$ м/с); 3 – шерстяного войлока ($t_c = 90, 120$ °С; $v = 3, 5$ м/с); 4 – технического картона ($t_c = 90, 110$ °С; $v = 3, 5$ м/с); 5 – натуральной кожи ($t_c = 40, 50, 60$ °С; $v = 0,5, 1,0, 2,0$ м/с)

Fig. 3. Dependence of the complex m_u/N on the initial moisture content of the material \bar{u}_0 for the processes of heat treatment and drying:

- 1 – ceramics (drying mode: $t_c = 90, 120$ °С; $v = 3, 5$ м/с);
2 – sheet asbestos ($t_c = 90, 120$ °С; $v = 3, 5, 10$ м/с);
3 – woolen felt ($t_c = 90, 120$ °С; $v = 3, 5$ м/с); 4 – technical cardboard
($t_c = 90, 110$ °С; $v = 3, 5$ м/с); 5 – natural leather ($t_c = 40, 50, 60$ °С; $v = 0,5, 1,0, 2,0$ м/с)

Из (11), (12) находим среднеинтегральную температуру материала и длительность процесса тепловой обработки и сушки:

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{м.т}) \exp(-m_t \tau_{II}); \quad (14)$$

$$\tau = -\frac{1}{m_u} \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_0 - u_p}. \quad (15)$$

В результате обработки опытных данных по тепловой обработке и сушке керамики, асбеста, шерстяного войлока, технического картона для различных режимов при конвективной сушке установлена формула для темпа нагрева [9, 10]

$$m_t \approx 0,105 \exp(-2\bar{u}_{кр}). \quad (16)$$

Запишем (6) в виде выражения для теплообменных критериев Нуссельта [11]

$$\frac{Nu}{Nu_{кр}} = \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{кр}} = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^n \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{м.т}} = \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} (1 + Rb), \quad (17)$$

где Nu , $Nu_{кр}$, $\bar{\alpha}_{кр}$, $\bar{\alpha}$, – критерии Нуссельта и коэффициенты теплоотдачи в первом и втором периодах; $n = 0,5$ [11].

Принимая $u_p = 0$ и $Rb = 0$, получим

$$\frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{м.т}} = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1-n} = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{0,5}.$$

Температура на поверхности материала

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{m.t}) \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{0.5} \quad (18)$$

При исследованиях кинетики сушки различных материалов широко используется комплексная переменная $N\tau$, называемая обобщенным временем сушки, которая при заданном начальном влагосодержании материала \bar{u}_0 не зависит от режима тепловой обработки [2, 3, 12].

На рис. 4а представлена зависимость $N\tau_{II}$ от относительного влагосодержания $\bar{u}/\bar{u}_{кр}$ для процессов сушки пористой керамики, листового асбеста и шерстяного войлока. Кривые выражаются уравнением

$$N\tau_{II} \approx B \exp(-2,2\bar{u}/\bar{u}_{кр}), \quad (19)$$

где B – коэффициент, определяемый опытным путем.

Длительность процесса с учетом времени сушки в первом периоде

$$\tau = \frac{1}{N} \left((\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}) + B \exp(-2,2\bar{u}/\bar{u}_{кр}) \right). \quad (20)$$

Коэффициент B не зависит от отношения $\bar{u}/\bar{u}_{кр}$ и режима сушки, принимает постоянные значения (рис. 4б): для керамики $B = 0,40$; асбеста $B = 0,60$; войлока $B = 1,65$.

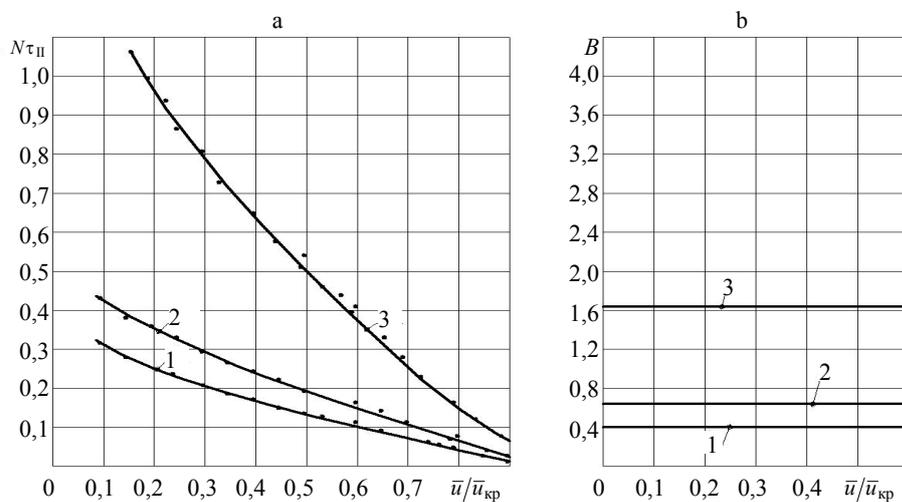


Рис. 4. Зависимости комплексной переменной $N\tau_{II}$ (а) и коэффициента B (б) от относительного влагосодержания $\bar{u}/\bar{u}_{кр}$ в процессах сушки: 1 – пористой керамики;

2 – листового асбеста; 3 – шерстяного войлока; режимы указаны на рис. 2

Fig. 4. Dependences of the complex variable $N\tau_{II}$ (a) and the coefficient B (b) on the relative moisture content $\bar{u}/\bar{u}_{кр}$ in the processes of drying: 1 – porous ceramics;

2 – sheet asbestos; 3 – wool felt; the modes are shown in Fig. 2

В табл. 1 дано сопоставление экспериментальных значений параметров сушки с расчетными, вычисленными по уравнениям.

Таблица 1

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений параметров тепловой обработки и сушки
Comparison of the calculated and experimental values of the parameters of heat treatment and drying

Влагосодержание \bar{w}	Время τ , мин			Среднеинтегральная температура \bar{t} , °С			Плотность потока теплоты во втором периоде q_{II} , Вт/м ²	
	(экс.)	(15)	(20)	(экс.)	(10)	(14)	(6)	(7)
Керамика: $120 \times 78 \times 5$ мм; $\rho_0 = 1680$ кг/м ³ . Режим сушки: $t_c = 120$ °С; $t_{м.т} \approx 49$ °С; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %; $\bar{u}_0 = 0,2$; $\bar{u}_{кр} = 0,1$; $N = 0,028$ мин ⁻¹ ; $m_u = 0,138$ мин ⁻¹ ; $m_t = 0,0945$ мин ⁻¹ ; $q_1 = 7700$ Вт/м ² ; $\tau_1 = 4,6$ мин ⁻¹								
0,08	6,5	7,2	6,8	60	63,2	59,6	6529	6500
0,06	9,0	9,3	8,8	71	73,2	68,8	5174	5200
0,04	11,5	12,2	11,7	80	82,4	81,4	3757	3800
0,02	16,5	17,3	17,2	96	96,5	95,5	2030	2100
Листовой асбест: $120 \times 80 \times 6$ мм; $\rho_0 = 770$ кг/м ³ . Режим сушки: $t_c = 120$ °С; $t_{м.т} \approx 42$ °С; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %; $\bar{u}_0 = 0,46$; $\bar{u}_{кр} = 0,2$; $N = 0,028$ мин ⁻¹ ; $m_u = 0,085$ мин ⁻¹ ; $m_t = 0,076$ мин ⁻¹ ; $q_1 = 5160$ Вт/м ² ; $\tau_1 = 9,0$ мин ⁻¹								
0,16	11,5	11,4	11,9	54	55	56,4	4290	4300
0,14	13,0	12,8	13,0	57	59	57,5	3828	3900
0,12	15,0	14,6	15,0	64	66	65,3	3375	3400
0,08	19,5	18,5	18,6	78	79	78,2	2290	2300
0,04	26,0	24,8	24,6	88	90	90,0	1285	1300
Шерстяной войлок: $130 \times 100 \times 8$ мм; $\rho_0 = 200$ кг/м ³ . Режим сушки: $t_c = 120$ °С; $t_{м.т} \approx 40$ °С; $v = 3$ м/с; $\varphi = 5$ %; $\bar{u}_0 = 1,14$; $\bar{u}_{кр} = 0,75$; $N = 0,052$ мин ⁻¹ ; $m_u = 0,052$ мин ⁻¹ ; $m_t = 0,024$ мин ⁻¹ ; $q_1 = 3200$ Вт/м ² ; $\tau_1 = 7,5$ мин ⁻¹								
0,6	12	12,3	11,9	49	47,5	48,0	2850	2900
0,5	15	15,8	14,5	51	51,5	52,2	2560	2550
0,4	19	19,7	19,3	56	56,3	56,5	2270	2300
0,3	24	24,4	24,7	59	59,5	61,6	1920	1900
0,2	31	32,2	31,3	65	67,2	68,3	1560	1540

Теплообмен

Для расчета теплообмена при тепловой обработке и сушке теплоизоляционных материалов использовали формулу для теплообменного критерия Нуссельта [2, 4, 7, 11]

$$Nu = C Re^{0,5} \left(\frac{T_c}{T_{м.т}} \right)^2 \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^n, \quad (21)$$

где Re – число Рейнольдса; $T_c, T_{м.т}$ – абсолютная температура соответственно среды и мокрого термометра; C – коэффициент, определяе-

мый опытным путем: для керамики $C = 0,700$, асбеста $C = 0,435$, войлока $C = 0,435$; $n = 0,5$.

Коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$ определяли из критерия Нуссельта, Вт/(м²·°C):

$$\bar{\alpha} = Nu \lambda_{\text{вл}} / l,$$

где $\lambda_{\text{вл}}$ – коэффициент теплопроводности влажного материала, Вт/(м · °C); l – длина образца материала по набеганию потока воздуха, м.

В процессах тепловой обработки влажных материалов термические коэффициенты $\lambda_{\text{вл}}$, $c_{\text{вл}}$ и коэффициент температуропроводности a меняются в зависимости от влагосодержания и температуры. Наибольшие изменения претерпевает коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{вл}}$. Коэффициент температуропроводности a изменяется мало, поскольку со снижением $\lambda_{\text{вл}}$ одновременно уменьшается произведение $c_{\text{вл}}\rho$ приблизительно с такой же скоростью [7, 15]. Средняя удельная теплоемкость $c_{\text{вл}}$ зависит от влагосодержания материала и в незначительной степени от температуры.

Коэффициент теплопроводности сухих теплоизоляционных материалов λ_0 почти не зависит от температуры в области от 30 до 90 °C [2, 7, 16–19]. Обработка опытных данных по коэффициенту теплопроводности влажных материалов $\lambda_{\text{вл}}$ для керамики и листового асбеста реализована на основе формулы В. И. Дубницкого [2, 7]

$$\lambda_{\text{вл}} = \lambda_0 + A_1 \bar{t} \bar{u} \exp(-B_0 \bar{u}),$$

где A_1 , B_0 – коэффициенты, определяемые опытным путем: для керамики $A_1 = 0,075$, $B_0 = 2$; $\lambda_0 = 0,80$ Вт/(м·°C); для асбеста $A_1 = 0,03$, $B_0 = 2$; $\lambda_0 = 0,12$ Вт/(м·°C);

Коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{вл}}$ для войлока практически не зависит от температуры до $t_c \approx 90$ °C. Зависимость коэффициентов теплопроводности для теплоизоляционных материалов от влажности хорошо изучена [17, 20] и приближенно определяется соотношением

$$\lambda_{\text{вл}} \approx \lambda_0 \left(\frac{d\lambda}{dW} \right) W,$$

где W – влагосодержание материала, %; $\frac{d\lambda}{dW}$ – прирост коэффициента теплопроводности на каждый 1 % прироста влажности.

В сушильной технике принята связь $\bar{u}(\tau) = 0,01W(\tau)$. Для войлока ($\rho \approx 150\text{--}350$ кг/м³) величина $\frac{d\lambda}{dW}$ приближенно составляет 2,9–4,6, и с погрешностью не более 5 % установлена зависимость [19]

$$\lambda_{\text{вл}} = \lambda_0 + 0,0031W.$$

Теплообменный критерий Bi вычисляли по соотношению $Bi = \bar{\alpha}R/\lambda_{вл}$, где R – половина толщины материала. В табл. 2 приведены результаты расчетов коэффициентов теплообмена, числа Био и среднеинтегральных температур в процессах тепловой обработки и сушки керамики и листового асбеста. Погрешность при обработке экспериментальных данных находится в пределах точности проведения эксперимента и составляет 3–5 %.

Таблица 2

Значения коэффициентов теплоотдачи, числа Био и интегральных температур в процессах тепловой обработки и сушки
Values of heat transfer coefficients, Biot number and integral temperatures in the processes of heat treatment and drying

Влаго- содержание \bar{w}	Коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$, Вт/(м ² · °С)	Коэффициент теплопроводности влажного материала $\lambda_{вл}$, Вт/(м ² · °С)	Число Bi	Время τ , мин (экс.)	Среднеинтегральная температура \bar{t} , °С			
					(экс.)	(10)	(13)	(18)
Керамика: 120×78×5 мм; $\rho_0 = 1680$ кг/м ³ ; $\lambda_0 = 0,8$ Вт/(м ³ · °С)								
0,08	38,5	0,79	0,121	6,5	60	63,2	59,6	61,5
0,06	35,6	0,71	0,123	9,0	71	73,2	68,8	72,4
0,04	28,5	0,62	0,120	11,5	80	82,4	81,4	82,2
0,02	22,7	0,53	0,112	17,5	96	96,5	95,5	97,4
Листовой асбест: 120×80×6 мм; $\rho_0 = 770$ кг/м ³ ; $\lambda_0 = 0,12$ Вт/(м ³ · °С)								
0,16	35,5	0,365	0,261	11,5	54	55	56	55,5
0,14	28,2	0,356	0,233	13,0	57	59	57,5	58,4
0,12	24,6	0,338	0,226	15,0	64	66	65,3	65,6
0,08	21,5	0,284	0,222	19,5	78	79	78,8	79,5
0,04	15,4	0,213	0,212	26,0	88	90	90	90,6
0,02	9,8	0,175	0,165	32,0	96	98	97	98,5

Примечание. Режимы обработки даны в табл. 1.

ВЫВОД

На основе уравнения кинетики сушки А. В. Лыкова и элементов теории регулярного режима рассмотрен тепломассоперенос во влажных теплоизоляционных материалах. Приведен расчет основных кинетических характеристик при тепловой обработке и сушке. Для практического использования уравнений необходимо знать скорость сушки в первом периоде и критическое влагосодержание материала. Представлен анализ достоверности полученных уравнений и дано сопоставление расчетных значений с экспериментальными.

ЛИТЕРАТУРА

- Сафаров, Ж. Э. Разработка гелиоаккумуляционной сушильной установки на основе теоретических исследований аккумуляции солнечной энергии / Ж. Э. Сафаров, Ш. А. Султанова, Г. Т. Дадаев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 2. С. 174–192. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-174-192>.
- Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 472 с.

3. Сажин, Б. С. Научные основы техники сушки / Б. С. Сажин, В. Б. Сажин. М.: Наука, 1997. 447 с.
4. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. Минск: Белорусская наука, 2010. 443 с.
5. Рудобашта, С. П. Теплотехника / С. П. Рудобашта; изд. 2-е, доп. М.: Перо, 2015. 672 с.
6. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 536 с.
7. Лыков, А. В. Теоретические основы строительной теплофизики / А. В. Лыков. Минск: Изд. АН БССР, 1961. 519 с.
8. Тепло- и массообмен: в 2 ч. / Б. М. Хрусталева [и др.]; под ред. А. П. Несенчука. Минск: БНТУ, 2009. Ч. 2. 274 с.
9. 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.
10. Ольшанский, А. И. Регулярный тепловой режим нагревания влажных плоских капиллярно-пористых материалов в процессе сушки / А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87, № 6. С. 1308–1318.
11. 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.
12. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. М.: Энергия, 1973. 288 с.
13. Куц, П. С. К вопросу приближенной методики расчета кинетики конвективной сушки плоских материалов / П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 1975. Т. 28, № 4. С. 594–598.
14. 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>.
15. Шорин, С. Н. Теплопередача / С. Н. Шорин. М.: Высшая школа, 1964. 490 с.
16. Ольшанский, А. И. Аналитический расчет температуры в процессе сушки тонких капиллярно-пористых плоских материалов / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2018. Т. 63, № 3. С. 333–341. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-333-341>.
17. Франчук, А. У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов / А. У. Франчук. М.: НИИ строительной физики, 1969. 143 с.
18. Блази, В. Строительная физика: Справочник проектировщика. М.: Техносфера, 2005. 536 с.
19. Колесников, П. А. Теплозащитные свойства одежды / П. А. Колесников. М.: Легкая индустрия 1965. 337 с.
20. Физические величины / под ред. И. С. Григорьева, Е. Х. Меймехова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

Поступила 30.06.2021 Подписана в печать 07.09.2021 Опубликована онлайн 31.03.2022

REFERENCES

1. Safarov J. E., Sultanova Sh. A., Dadayev G. T. (2020) Development of Solar Accumulating Drying Equipment Based on the Theoretical Studies of Solar Energy Accumulation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (2), 174–192. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-174-192> (in Russian).
2. Lykov A. V. (1968) *Drying Theory*. Moscow, Energiya Publ. 472 (in Russian).
3. Sazhin B. S. (1984) *Scientific Fundamentals of Drying Technique*. Moscow, Khimiya Publ. 320 (in Russian).

4. Akulich P. V. (2010) *Calculations of Drying and Heat Exchange Installations*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 443 (in Russian).
5. Rudobashta S. P. (2015) *Heat Engineering*. 2nd ed. Moscow, Pero Publ. 672 (in Russian).
6. Lykov A. V., Mikhailov Y. A. (1963) *Theory of Heat and Mass Transfer*. Moscow; Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 536 (in Russian).
7. Lykov A. V. (1961) *Theoretical Foundations of Construction Thermophysics*. Minsk, AN BSSR Publ. 519 (in Russian).
8. Khrustalev B. M., Nesenchuk A. P., Timoshpol'skii V. I., Akel'ev V. D., Sednin, V. A., Kopko V. M., Nerez'ko A. V. (2009) *Heat and Mass Transfer. Part 2*. Minsk, BNTU. 274 (in Russian).
9. Ol'shanskii A. I., Gusarov A. M. (2017) Experimental Study of the Kinetics of Drying of Thin Plane Moist Materials by the Regular-Regime Method Using Generalized Complex Variables. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 90 (3), 665–678. <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1614-x>.
10. 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>.
11. Lykov A. V., Kuts P. S., Ol'shanskii A. I. (1972) Kinetics of heat Transfer During the Desiccation of Moist Materials. *Journal of Engineering Physics*, 23 (3), 1082–1086. <https://doi.org/10.1007/BF00832214>.
12. Krasnikov V. V. (1973) *Conductive Drying*. Moscow, Energiya Publ. 288 (in Russian).
13. Kuts P. S., Ol'shanskii A. I. (1975) Approximate Method of Calculating the Kinetics of Convective Drying of Flat Materials. *Journal of Engineering Physics*, 28 (4), 419–422. <https://doi.org/10.1007/bf00878212>.
14. 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).
15. Shorin S. N. (1964) *Heat Transfer*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 490 (in Russian).
16. Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V., Gusarov A. M. (2018) Calculation of the Kinetics of Heat Transfer Using the Experimental Data of Moisture Exchange in the Process of Convective Drying of Thin Flat Materials. *Vesti Natsyonal'noi Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, 63 (3), 333–341. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-333-341> (in Russian).
17. Franchuk A. U. (1969) *Tables of Thermal Performance of Construction Materials*. Moscow, Research Institute of Construction Physics Publ. 143 (in Russian).
18. Blazi V. (2005) *Construction Physics: Designer's Handbook*. Moscow, Tekhnosfera Publ. 536 (in Russian).
19. Kolesnikov P. A. (1965) *Thermal Protection Properties of Clothing*. Moscow, Legkaya Industriya Publ. 337 (in Russian).
20. Grigorieva I. S., Meimekhova E. Kh. (eds.) (1991) *Physical Quantities*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1232 (in Russian).