

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

УДК 66.047.37

Поступила в редакцию 24.02.2017
Received 24.02.2017

А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, В. И. Ольшанский

Витебский государственный технологический университет, Витебск, Республика Беларусь

**КИНЕТИКА ТЕПЛООБМЕНА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ
ВЛАГООБМЕНА В ПРОЦЕССЕ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ТОНКИХ ПЛОСКИХ
МАТЕРИАЛОВ**

Аннотация. Приведены результаты исследования сушки тонких плоских материалов методом регулярного теплового режима. Дана обработка экспериментальных данных обобщенными комплексными переменными. На основании обработки и анализа эксперимента получены приближенные эмпирические уравнения для расчета плотности тепловых потоков, длительности процесса сушки и температуры материала в периоде убывающей скорости сушки. Приведен расчет кинетики сушки без использования критериальных уравнений теплообмена по данным влагообмена. Для группы тонких плоских материалов получены уравнения для определения темпа нагревания влажного материала и темпа убыли влагосодержания. Показано, что регуляризация в процессе сушки происходит не только по температурам и влагосодержаниям, но и по тепловым потокам. Дан анализ сушки тонких плоских материалов по величине теплообменного критерия Био в периоде убывающей скорости сушки. Показано, что во втором периоде сушки критерий Био меньше 1 и принимает значения 0,2–0,5. Установлено, что темп нагрева влажного тела не зависит от режима сушки и толщины материала. Анализ кривых сушки показал, что темп убыли влагосодержания является сложной функцией режима сушки, начального влагосодержания, скорости сушки в первом периоде и ряда факторов, влияющих на процесс. Обработка опытных данных на основе обобщенных устойчивых комплексных переменных, представляющих собой наиболее общие закономерности кинетики сушки, позволяет получить достаточно простые и надежные приближенные уравнения для расчета теплообмена в процессе сушки. Погрешность при таком методе обработки эксперимента находится в пределах 3–5 %. Проведена проверка достоверности расчетных уравнений и сопоставление численных значений тепловых потоков, температур и длительности процесса с экспериментом.

Ключевые слова: среднинеинтегральная температура, обобщенное время сушки, скорость сушки, влагосодержание, темп нагрева тела, темп убыли влаги, критерии Био, Фурье, число Ребиндера

Для цитирования. Ольшанский, А. И. Кинетика теплообмена по экспериментальным данным влагообмена в процессе конвективной сушки тонких плоских материалов / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, В. И. Ольшанский // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – №4. – С. 46–54.

A. I. Ol'shanskii, S. V. Zhernosek, V. I. Ol'shanskii

Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Belarus

**THE KINETICS OF HEAT TRANSFER USING EXPERIMENTAL DATA OF MOISTURE EXCHANGE
IN THE PROCESS OF CONVECTIVE DRYING OF THIN FLAT MATERIALS**

Abstract. The results of studies of drying of thin flat materials by method regular thermal regime are presented. The results of experimental data processing using generalized complex variables are shown. The approximate empirical equation for calculating the heat flow density, the duration of the drying process and the temperature of material at the period of decreasing rate were obtained by processing and analysis of experimental data. The article also indicated kinetics drying calculation with the experimental data of moisture exchange and without the use of criteria heat exchange equations. The equations for determining the rate of heating of the wet material and the rate of decrease in moisture content were obtained by the authors for a group of thin flat materials. The paper demonstrates that the regularization in the drying process takes place not only for temperature and moisture content, but also for thermal flow. An analysis of drying of thin flat materials by the magnitude

of the Biot heat exchange criterion in the period of the decreasing drying rate was performed. It was found that in the second drying period, the Biot number is less than 1 and takes the values 0.2–0.5. It is established that the rate of heating of wet material does not depend on the drying regime and the thickness of the material. Analysis of drying curves showed that the rate of moisture content loss is a complex function of the drying regime, initial moisture content, drying speed in the first period, and a number of factors affecting the process. The processing of experimental data on the basis of generalized stable complex variables, which represent the most general regularities of the kinetics of drying, makes it possible to obtain fairly simple and reliable approximate equations for the calculation of heat and moisture exchange in the drying process. The inaccuracy with this method of processing the experiment is within 3–5 %. Validation of the estimated equations and comparison of the numerical values of the heat flows the temperature and duration of the drying process with the experiment were implemented.

Keywords: average integral temperature, generalized drying time, drying rate, moisture content, rate of heating of the material, rate of moisture decrease, criteria Bio and Fourier, the number Rebinder

For citation. Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V., Ol'shanskii V. I. The kinetics of heat transfer using experimental data of moisture exchange in the process of convective drying of thin flat materials. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 4, pp. 46–54 (in Russian).

Введение. Сушка влажных материалов не только теплотехнический, но и технологический процесс, в котором изменяются технологические и механические свойства высушиваемого материала. Длительность сушки является важным фактором при выборе метода и режима сушки. Правильно организованный режим сушки должен обеспечивать высокие технологические свойства материала, и в этой организации главным фактором является длительность сушки.

Постановка задачи. Процесс сушки представляет собой сложный комплекс тесно связанных явлений, протекающих как в материале, так и на его поверхности. Многообразие факторов и их сложная взаимосвязь затрудняет получение аналитических зависимостей для расчета кинетики сушки конкретного материала.

Поэтому при описании кинетики сушки на основе обработки экспериментальных данных используются эмпирические зависимости с минимальным количеством постоянных, определяемых опытным путем.

Из решения системы уравнений влагопереноса при постоянных коэффициентах переноса Льюисом, а затем А. В. Лыковым [1, 2] для пластины получено уравнение кривой скорости сушки

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} \approx \frac{a_m}{R_V^2} \frac{1}{\left(\frac{4}{\pi^2} + \frac{1}{Bi_m}\right)} (\bar{u} - u_p), \quad (1)$$

где a_m – коэффициент диффузии влаги, м²/ч; R_V – характерный размер тела, м; \bar{u} , u_p – текущее и равновесное влагосодержание материала; Bi_m – массообменный критерий Био. Если обозначить $a_m/R_V(4/\pi^2 + 1/Bi_m) = K$, то получим уравнение кривой скорости сушки

$$-\frac{du}{d\tau} = K(\bar{u} - u_p). \quad (2)$$

При расчете длительности сушки во втором периоде в простейшем случае при выборе линейной аппроксимации кривой скорости коэффициент сушки K определяется уравнением [2–5]

$$K = \frac{N}{\bar{u}_{кр} - u_p}, \quad (3)$$

где N – скорость сушки в первом периоде, мин⁻¹; $\bar{u}_{кр}$ – критическое влагосодержание материала.

Коэффициент сушки K определяется экспериментально, построением зависимости $\lg(\bar{u} - u_p) = f(\tau)$ [2, 4].

Кинетика тепловлагообмена. Все известные способы представления кривой скорости сушки обусловлены ее графическим дифференцированием, что связано с погрешностями эксперимента. Методы, основанные на обработке кривой скорости сушки, не могут быть универсальными, и следует использовать другие методы обработки опытных данных, не связанные с графическим дифференцированием кривой сушки. Погрешность при обработке экспериментальных данных методом обобщенных переменных находится в пределах точности проведения эксперимента и составляет 3–5 %.

Уравнение теплового баланса для периода убывающей скорости сушки [2, 4, 5] можно записать в виде

$$Q_{II} = \bar{\alpha}(t_c - t_{II})F = rm_0 \frac{d\bar{u}}{d\tau} + (c_0 m_0 + c_{ж} m_{ж}) \frac{d\bar{t}}{d\tau}, \quad (4)$$

где Q_{II} – мощность теплового потока, Вт; $\bar{\alpha}$ – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·°C); t_c, t_{II} – соответственно температура среды и поверхности материала, °C; F – поверхность влажного тела, м²; r – теплота парообразования, Дж/кг; $m_0, m_{ж}$ – соответственно масса сухого тела и жидкости, кг; $c_0, c_{ж}$ – удельные теплоемкости сухого тела и жидкости, Дж/(кг·°C); $d\bar{t}/d\tau$ – скорость нагрева влажного тела, °C/c.

Поскольку влагосодержание тела $\bar{u} = m_{ж}/m_0$, то $c_W m_0 = m_0(c_0 + c_{ж}\bar{u})$, где $c_W = c_0 + c_{ж}\bar{u}$ – теплоемкость влажного тела.

Основное уравнение кинетики сушки [2, 4, 5]

$$q_{II} = q_I N^* (1 + Rb), \quad (5)$$

где $Rb = c_W b/r$ – критерий Ребиндера; $b = |d\bar{t}/d\bar{u}|$ – температурный коэффициент сушки, °C; N^* – относительная скорость сушки.

Плотность теплового потока в первом периоде сушки равна [2]

$$q_I = r\rho_0 R_V N, \quad (6)$$

где ρ_0 – плотность сухого тела, кг/м³; N – скорость сушки в первом периоде, с⁻¹.

На основании уравнений (5) и (6) запишем уравнение (4) в виде

$$Fr\rho_0 R_V N (1 + Rb) N^* = rm_0 \frac{d\bar{u}}{d\tau} + c_W m_0 \frac{d\bar{t}}{d\tau}. \quad (7)$$

С учетом $R_V = V_0/F$; $\rho_0 = m_0/V_0$; $d\bar{t}/d\bar{u} = Rbr/c_W$; соотношения $\rho_0 R_V/F = m_0/F$ и определения числа Rb запишем $d\bar{t}/d\tau = r/c_W Rb d\bar{u}/d\tau$, и, переходя к удельным тепловым потокам на единицу поверхности испарения тела F , после простых преобразований уравнение (7) примет вид [5]

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = NN^*. \quad (8)$$

Из уравнения (8) определяется скорость сушки в любой момент второго периода по величине N в первом периоде для любого режима и величине N^* для заданного влагосодержания [5].

Обработкой многих экспериментальных данных по сушке различных материалов при различных методах энергоподвода получена общая зависимость для относительной скорости сушки [6, 7]

$$N^* = \exp(-a_0 N \tau_{II}), \quad (9)$$

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

Постоянная a_0 для всей группы исследуемых материалов определяется по зависимости $a_0 = 0,8/\bar{u}_{кр}$ [6, 7]. Скорость сушки во втором периоде из уравнения (9)

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = N \exp(-a_0 N \tau_{II}). \quad (10)$$

Интегрируя уравнение (10) с учетом времени сушки в первом периоде, получим

$$\tau = \frac{1}{N} \left[(\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}) - \frac{1}{a_0} \ln(1 - a_0(\bar{u}_{кр} - \bar{u})) \right], \quad (11)$$

где \bar{u}_0, \bar{u} – соответственно начальное и текущее влагосодержание материала. Использование метода обобщения эксперимента на основе $N\tau$ и N^* дает хорошие результаты, если критическое влагосодержание $\bar{u}_{кр}$ не зависит от режима сушки. Данные различных исследований показывают, что величина $\bar{u}_{кр}$ для многих материалов незначительно изменяется при варьировании режима

сушки и этим изменением можно пренебречь [1, 2, 5]. Следовательно, для расчета длительности сушки по формуле (11) необходимо знать величины N и $\bar{u}_{кр}$.

При выбранном способе линейной аппроксимации кривой скорости $d\bar{u}/d\tau = f(\tau)$ и при известном коэффициенте сушки K длительность сушки во втором периоде определяется интегрированием уравнения (2) при $K = \text{const}$ в пределах от $\tau_I = 0$ до τ_{II} (второй период сушки и от $\bar{u}_{кр}$ до \bar{u}).

$$\int_0^{\tau_{II}} d\tau = -\frac{1}{K} \int_{\bar{u}_{кр}}^{\bar{u}} \frac{d\bar{u}}{\bar{u} - \bar{u}_{кр}}, \bar{u} < \bar{u}_{кр}; \tau_{II} = -\frac{1}{K} \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p}, \bar{u} < \bar{u}_{кр}. \quad (12)$$

Подставляя в (12) значение коэффициента сушки K из (3) с учетом времени сушки в первом периоде, получим длительность до любого заданного текущего влагосодержания

$$\tau = \frac{1}{N} \left[(\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}) - (\bar{u}_{кр} - u_p) \ln \left(\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right) \right]. \quad (13)$$

При температурах теплоносителя $\bar{t}_c > 90^\circ\text{C}$ равновесное влагосодержание материала $u_p \approx 0$ [5]. На рис. 1, а представлены результаты обработки эксперимента для зависимости $z = a_0 N \tau_{II} = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$ для процессов сушки пористой керамики, листового асбеста, шерстяного войлока и технического картона. Видно, что с допустимым разбросом все опытные точки ложатся на одну кривую. Обработкой опытных данных получено приближенное уравнение

$$z = a_0 N \tau_{II} \approx 0,24 \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{-1,25}. \quad (14)$$

Подставляя (14) в (9), получим выражение для относительной скорости сушки

$$N^* \approx \exp \left[-0,24 \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{-1,25} \right]. \quad (15)$$

Плотность тепловых потоков для периода падающей скорости сушки определяется из основного уравнения кинетики сушки (5), не прибегая к расчетам коэффициента теплообмена $\bar{\alpha}$ по критериальным выражениям. Уравнение кинетики сушки (5) с учетом уравнений (2), (3) и (6) запишется в виде

$$q_{II} = r \rho_0 R_V N \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right) (1 + \text{Rb}); \quad u_p < \bar{u} < \bar{u}_{кр}. \quad (16)$$

На рис. 1, б представлены зависимости $q_{II} = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$, вычисленные по формулам (5) и (16). Критерий Ребиндера Rb в периоде постоянной скорости сушки равен 0. Во втором периоде с уменьшением влагосодержания материала Rb возрастает до значений $\approx 0,20-0,25$ при влагосодержаниях, близких к равновесным, $\bar{u} \approx 0,01-0,03$. Увеличение Rb в конце сушки указывает на необходимость прекращения процесса для избежания пересушивания материала и перерасхода энергии на сушку.

Зависимость числа $\text{Rb} = f(\bar{u})$ для многих материалов описывается эмпирической формулой [1, 2, 4–7]

$$\text{Rb} = A \exp(-n(\bar{u} - u_p)). \quad (17)$$

Значения постоянных A и n для некоторых влажных материалов даны в [8].

Регулярный режим. Для случая нагревания тонких плоских влажных тел в среде $\bar{t}_c = \text{const}$ при равномерном распределении температуры по объему тела и отсутствии термического переноса вещества в материале, когда теплообмен между поверхностями влажной пластины происходит по закону Ньютона, можно записать [9–11]

$$c_0 \rho_0 R_V \frac{d\bar{t}}{d\tau} = \bar{\alpha} (t_c - \bar{t}). \quad (18)$$

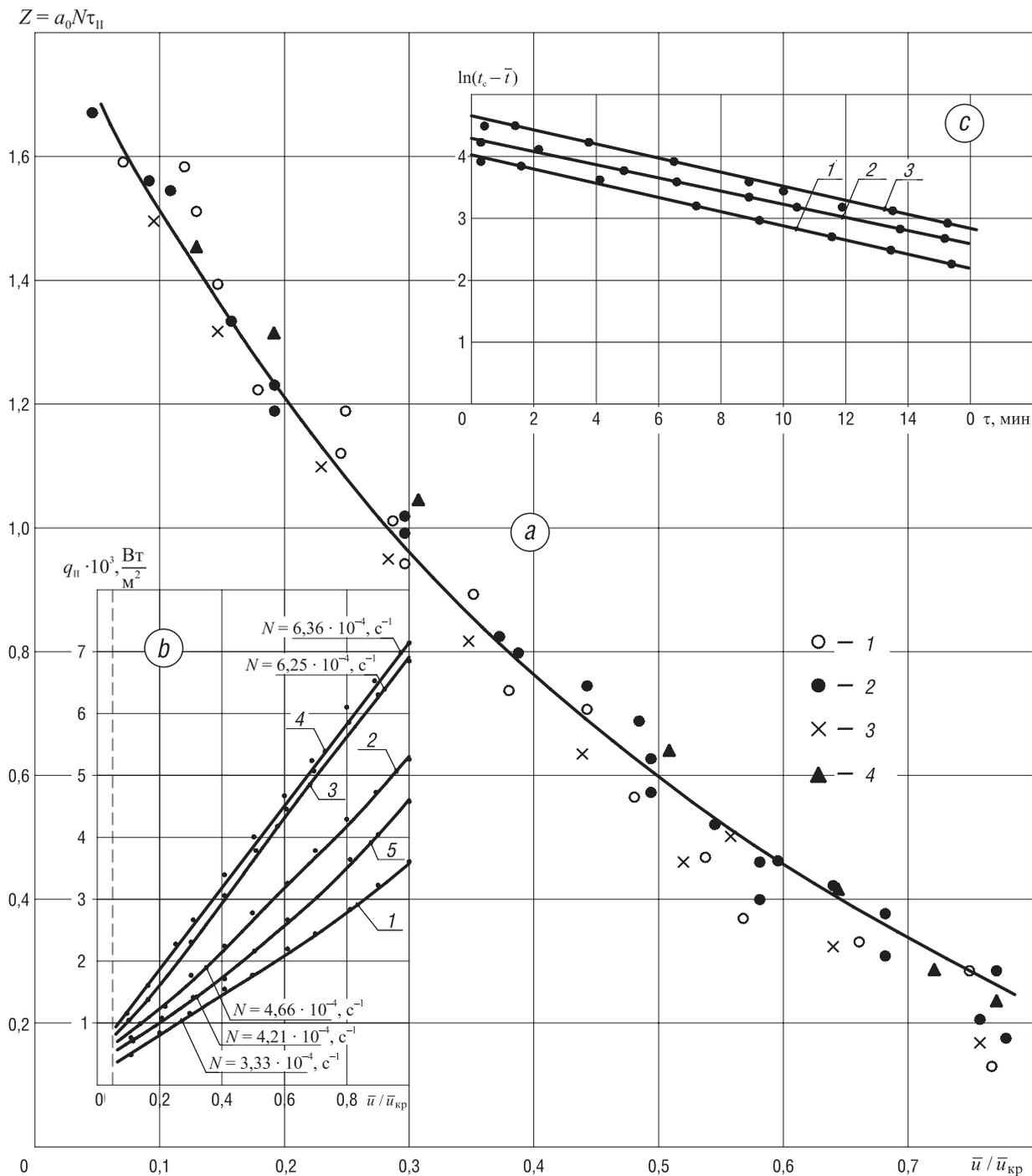


Рис. 1. Графики зависимости основных параметров сушки тонких материалов от относительного влагосодержания и длительности сушки: *a* – зависимость комплекса $z = a_0 N \tau_{II} = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$ в процессе сушки пористой керамики (1), листового асбеста (2), шерстяного войлока (3) и технического картона (4) при режимах: $t_c = 90^\circ C$; $120^\circ C$; скорость воздуха $v = 3$ и 5 м/с; *b* – зависимость плотности теплового потока q_{II} от относительного влагосодержания в процессе сушки листового асбеста при режимах: 1 – $120^\circ C$, 3 м/с; 2 – $120^\circ C$, 5 м/с; 3 – $120^\circ C$, 10 м/с; 4 – $150^\circ C$, 5 м/с; 5 – $90^\circ C$, 5 м/с; *c* – зависимость $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\tau)$ для процесса сушки пористой керамики. Режимы сушки: 1 – $90^\circ C$, 2 – $120^\circ C$, 3 – $150^\circ C$; $v = 3$; 5 м/с

Fig. 1. Graphs of the dependence of the main parameters of drying of thin materials on the relative moisture content and drying time: *a* – dependence of the complex $z = a_0 N \tau_{II} = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$ for the drying process of porous ceramics (1), of sheet asbestos (2), of wool felt (3) and of technical paperboard (4) at drying regimes: $t_c = 90^\circ C$; $120^\circ C$; air velocity $v = 3$ and 5 m/s; *b* – dependence of the heat flux density q_{II} from the relative moisture content during the drying of sheet asbestos at regimes: 1 – $120^\circ C$, 3 m/s; 2 – $120^\circ C$, 5 m/s; 3 – $120^\circ C$, 10 m/s; 4 – $150^\circ C$, 5 m/s; 5 – $90^\circ C$, 5 m/s; *c* – dependence $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\tau)$ for the drying process of porous ceramics. Drying regimes: 1 – $90^\circ C$, 2 – $120^\circ C$, 3 – $150^\circ C$; $v = 3$; 5 m/s

Решение уравнения (18) имеет вид [10]

$$\bar{\Theta} = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{\text{м.т.}}} = \exp\left(-\frac{\bar{\alpha}}{c_0 \rho_0 R_V} \tau_{\text{II}}\right), \quad (19)$$

где $\bar{\Theta}$ – относительная избыточная температура влажного материала; $t_{\text{м.т.}}$ – температура мокрого термометра.

При сушке тонких плоских материалов теплообменный критерий $Bi < 1$ (малоинтенсивные процессы). Соотношение в уравнении (19) $\bar{\alpha} / c_0 \rho_0 R_V = m_t$ представляет собой темп нагрева твердого тела [9, 11]. Темп нагрева m_t определяется формой тела, условиями теплообмена поверхности тела с окружающей средой и для всех режимов сушки остается постоянной величиной [9, 11, 12]. Следовательно, для относительной температуры $\bar{\Theta}$ при $Bi < 1$ можно записать [9, 11]

$$\bar{\Theta} = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{\text{м.т.}}} = \exp(-m_t \tau_{\text{II}}). \quad (20)$$

Решение системы уравнений тепломассопереноса при граничных условиях третьего рода (сушка), когда безразмерный поток вещества на поверхности влажного тела – функция времени, дает зависимость безразмерной температуры $\bar{\Theta}$ и относительного влагосодержания \bar{U} как функцию критериев $Bi Fo$ и $Bi_m Fo_m$ [11]

$$\bar{\Theta} = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{\text{м.т.}}} = f(Bi Fo); \quad \bar{U} = \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_0 - u_p} = f(Bi_m Fo_m), \quad (21)$$

где Fo и Fo_m – теплообменный и массообменный критерии Фурье.

Теплообменные и массообменные критерии Bi и Bi_m в реальных условиях сушки имеют близкие численные значения [11].

Комбинации критериев $Bi Fo$ и $Bi_m Fo_m$ представляют собой важные обобщенные переменные [12]

$$Bi Fo = \frac{\bar{\alpha}}{c_0 \rho_0 R_V} \tau_{\text{II}} = m_t \tau_{\text{II}}; \quad Bi_m Fo_m = \frac{\bar{\alpha}_m}{c_m \rho_0 R_V} \tau = m_u \tau, \quad (22)$$

где $\bar{\alpha}_m$ – коэффициент массообмена; c_m – удельная массоемкость влажного тела; m_u – темп убыли влагосодержания.

Следовательно, для относительного влагосодержания \bar{U} , учитывая (22), можно записать зависимость

$$\bar{U} = \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_0 - u_p} = \exp(-m_u \tau). \quad (23)$$

Зависимость $\bar{U} = \bar{u} / \bar{u}_0 = f(m_u \tau)$ представлена на рис. 2, а для ряда влажных материалов при различных режимах сушки. Видно, что все экспериментальные точки с допустимым разбросом укладываются на одну кривую.

Темп нагрева влажного тела m_t и темп убыли влагосодержания m_u находятся экспериментально построением графических зависимостей $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\tau)$ (см. рис. 1, с) и $\ln(W_0 - \bar{W}) = f(\tau)$. На рис. 2, б даны зависимости $\ln(W_0 - \bar{W}) = f(\tau)$ для процесса сушки листового асбеста (I) и пористой керамики (II) при различных режимах.

Для тонких материалов наблюдается период постоянной температуры, совпадающий с периодом постоянной скорости сушки до первого критического влагосодержания $\bar{W}_{\text{кр}}$. С началом второго периода температура материала возрастает от $t_{\text{м.т.}} \approx t_{\text{II}}$ до температуры t_c при $\tau \rightarrow \infty$.

Темп убыли влагосодержания m_u является сложной функцией режима сушки, начального влагосодержания \bar{u}_0 , способа подвода тепла и ряда других факторов, влияющих на процесс сушки [12, 13]. Из рис. 2, б видно, что все прямые начинаются от начального влагосодержания \bar{u}_0 , а их направление определяется режимом сушки. Таким образом, регуляризация процесса по влагосодержанию наступает по окончании стадии прогрева материала. Обработкой результатов

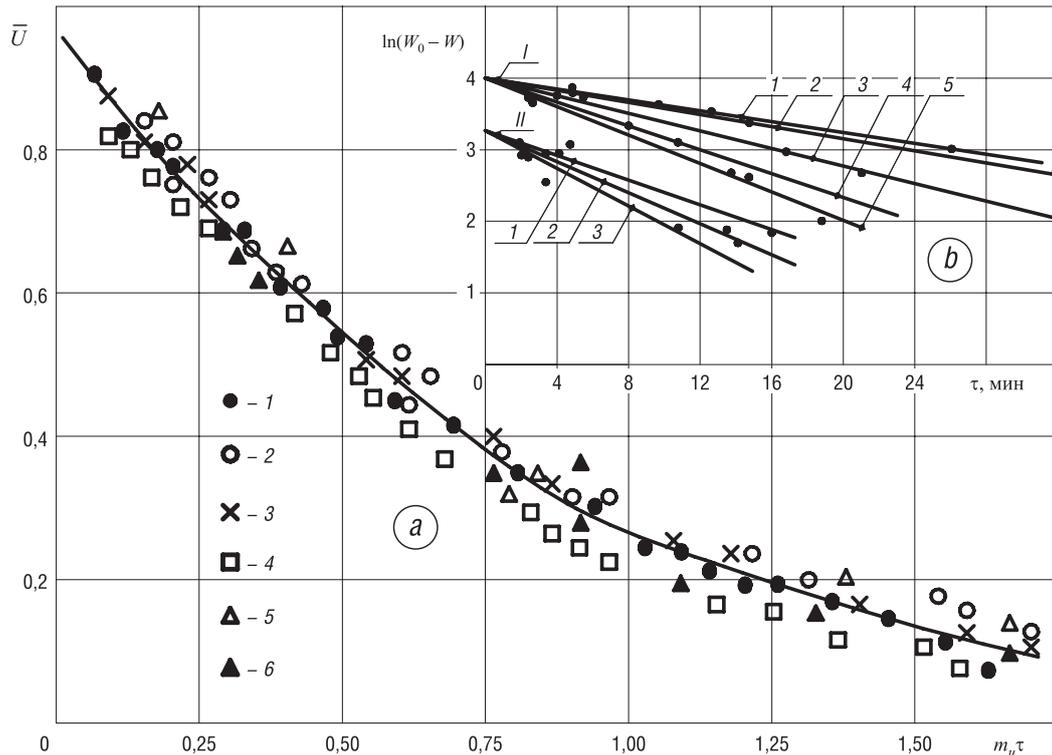


Рис. 2. Зависимости влагосодержания материала от длительности сушки: *a* – зависимость относительного влагосодержания $\bar{U} = \bar{u} / \bar{u}_0$ от обобщенной комплексной переменной $m_u \tau$ для процессов сушки. Режимы сушки: *I* – пористая керамика ($t_c = 90^\circ\text{C}$; 120°C , $\nu = 3$; 5 м/с); *2* – листовый асбест ($t_c = 90^\circ\text{C}$; 120°C ; 150°C , $\nu = 3$; 5 м/с); *3* – шерстяной войлок ($t_c = 90^\circ\text{C}$; 120°C ; 150°C , $\nu = 3$; 5 м/с); *4* – подошвенная кожа ($t_c = 40^\circ\text{C}$; 50°C ; 60°C , $\varphi = 25\text{--}45\%$, $\nu = 1$; 3 м/с); *5* – пластины красной глины $\delta = 10\text{--}12\text{ мм}$ ($t_c = 90^\circ\text{C}$; 120°C , $\nu = 3$; 5 м/с); *6* – технический картон ($t_c = 90^\circ\text{C}$; 120°C , $\nu = 3$; 5 м/с); *b* – зависимость $\ln(W_0 - \bar{W}) = f(\tau)$ для процесса сушки листового асбеста (*I*) и пористой керамики (*II*). Режимы сушки: (*I*): *1* – 90°C , $\nu = 5\text{ м/с}$; *2* – 120°C , $\nu = 3\text{ м/с}$; *3* – 120°C , $\nu = 5\text{ м/с}$; *4* – 120°C , $\nu = 10\text{ м/с}$; *5* – 150°C , $\nu = 5\text{ м/с}$; (*II*): *1* – 90°C , $\nu = 5\text{ м/с}$; *2* – 120°C , $\nu = 5\text{ м/с}$; *3* – 150°C , $\nu = 5\text{ м/с}$

Fig. 2. Dependence of the moisture content of the material on the drying time: *a* – dependence of the relative moisture content $\bar{U} = \bar{u} / \bar{u}_0$ for generalized complex variable $m_u \tau$ for drying processes. Drying regimes: *I* – porous ceramics ($t_c = 90^\circ\text{C}$; 120°C , $\nu = 3$; 5 м/с); *2* – sheet asbestos ($t_c = 90^\circ\text{C}$; 120°C ; 150°C , $\nu = 3$; 5 м/с); *3* – wool felt ($t_c = 90^\circ\text{C}$; 120°C ; 150°C , $\nu = 3$; 5 м/с); *4* – plantar skin ($t_c = 40^\circ\text{C}$; 50°C ; 60°C , $\varphi = 25\text{--}45\%$, $\nu = 1$; 3 м/с); *5* – plates of red clay $\delta = 10\text{--}12\text{ мм}$ ($t_c = 90^\circ\text{C}$; 120°C , $\nu = 3$; 5 м/с); *6* – technical paperboard ($t_c = 90^\circ\text{C}$; 120°C , $\nu = 3$; 5 м/с); *b* – dependence $\ln(W_0 - \bar{W}) = f(\tau)$ for the process of drying sheet asbestos (*I*) and porous ceramics (*II*). Drying regimes: (*I*): *1* – 90°C , $\nu = 5\text{ м/с}$; *2* – 120°C , $\nu = 3\text{ м/с}$; *3* – 120°C , $\nu = 5\text{ м/с}$; *4* – 120°C , $\nu = 10\text{ м/с}$; *5* – 150°C , $\nu = 5\text{ м/с}$; (*II*): *1* – 90°C , $\nu = 5\text{ м/с}$; *2* – 120°C , $\nu = 5\text{ м/с}$; *3* – 150°C , $\nu = 5\text{ м/с}$

экспериментальных исследований по сушке различных тонких материалов (пористая керамика $\delta = 5\text{ мм}$; листовый асбест $\delta = 4\text{--}6\text{ мм}$; шерстяной войлок $\delta = 6\text{--}8\text{ мм}$; технический картон $\delta = 4,5\text{ мм}$) установлены приближенные зависимости:

$$m_t = 0,115 \exp(-0,02W_{кр}); \tag{24}$$

$$m_u = 0,087N \exp(-0,02W_0). \tag{25}$$

Решением уравнений (20) и (23) определяются среднеинтегральная температура материала и длительность процесса сушки [12, 13]

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{м.т.}) \exp(-m_t \tau_{II}); \tag{26}$$

$$\tau = -\frac{1}{m_u} \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_0 - u_p}. \tag{27}$$

Проверка достоверности полученных формул и сопоставление расчетных и экспериментальных значений основных параметров приводятся в таблице.

Сопоставление экспериментальных значений среднеинтегральных температур и длительности сушки с расчетными по формулам (11), (13), (27) и (26) для некоторых влажных тонких материалов
Comparison of the experimental values of the mean integrated temperatures and the drying time with the calculated ones, which are obtained from formulas (11), (13), (27) and (26), for some moist thin materials

Пористая керамика, $\delta = 5$ мм							
Режим сушки: $t_c = 90$ °С; $v = 10$ м/с; $\bar{u}_0 = 0,2$; $\bar{u}_{кр} = 0,1$; $N = 0,018$ мин ⁻¹ ; $m_u = 0,105$ мин ⁻¹ ; $m_t = 0,0942$ мин ⁻¹ ; $t_{м.т.} \approx t_{п} = 37,5$ °С							
\bar{u} , %	$\tau_{экс}$, МИН	$\tau_{расч}$, МИН (11)	$\tau_{расч}$, МИН (13)	$\tau_{расч}$, МИН (27)	$\bar{t}_{экс}$, °С	$\bar{t}_{расч}$, °С (26)	$\tau_{пэксп}$, МИН
0,08	7,0	6,85	7,1	6,78	47	46,0	2,0
0,06	8,6	8,25	8,4	8,90	54	52,5	3,6
0,04	11,0	10,65	10,6	11,80	62	60,5	6,2
0,02	13,5	14,30	15,2	–	74	73,0	8,6
Шерстяной войлок, $\delta = 8$ мм							
Режим сушки: $t_c = 120$ °С; $v = 3$ м/с; $\bar{u}_0 = 1,14$; $\bar{u}_{кр} = 0,75$; $N = 0,00625$ мин ⁻¹ ; $m_u = 0,065$ мин ⁻¹ ; $m_t = 0,00256$ мин ⁻¹ ; $t_{м.т.} \approx t_{п} = 42$ °С							
0,6	9,5	9,35	9,15	10,4	47,0	48,0	3,0
0,5	12,0	11,6	11,4	12,9	51,0	51,5	5,5
0,4	15,0	14,4	14,2	15,7	56,2	57,0	8,5
0,3	18,2	17,8	17,6	19,0	60,6	61,2	11,7
0,2	22,5	21,4	22,3	–	64,7	65,4	16,2
Листовой асбест, $\delta = 6$ мм							
Режим сушки: $t_c = 120$ °С; $v = 3$ м/с; $\bar{u}_0 = 0,46$; $\bar{u}_{кр} = 0,20$; $N = 0,022$ мин ⁻¹ ; $m_u = 0,076$ мин ⁻¹ ; $m_t = 0,075$ мин ⁻¹ ; $t_{м.т.} \approx t_{п} = 40$ °С							
0,16	13,5	13,75	13,80	13,85	48,5	51,0	2,0
0,12	16,9	16,35	16,20	17,30	62,5	64,0	5,4
0,10	20,1	19,50	19,10	19,85	–	–	8,6
0,06	24,9	24,40	23,85	25,50	88,0	90,3	13,4
0,04	27,2	26,95	26,68	29,80	94,0	95,3	15,7
0,02	32,8	31,30	32,22	–	104,5	103,5	21,3

Заклучение. Представлены результаты обработки опытных данных на основе обобщенных комплексных переменных и регулярного теплового режима. Изложен способ расчета кинетики теплообмена на основе обработки эксперимента по кинетике влагообмена без использования критериальных уравнений теплообмена и определения коэффициентов теплообмена, что значительно сокращает объем расчетной работы. Приведены расчетные уравнения для определения основных параметров кинетики тепло- и влагообмена. Дана проверка полученных расчетных уравнений и сопоставление эксперимента с расчетными значениями основных параметров кинетики сушки.

Список использованных источников

1. Акулич, П.В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П.В. Акулич. – Минск: Беларус. наука, 2010. – 444 с.
2. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
3. Рудобашта, С.В. Теплотехника / С.В. Рудобашта. – М.: Колос, 2010. – 600 с.
4. Сажин Б.С. Основы техники сушки / Б.С. Сажин. – М.: Химия, 1984. – 320 с.
5. Красников, В.В. Кондуктивная сушка / В.В. Красников. – М.: Энергия, 1973. – 288 с.
6. Куц, П.С. Некоторые закономерности тепловлагообмена и приближенные методы расчета кинетики процесса сушки влажных материалов / П.С. Куц, А.И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 1977. – Т. 32, №6. – С. 1007–1014.
7. Ольшанский, А.И. Некоторые закономерности кинетики сушки пищевых продуктов / А.И. Ольшанский, П.С. Куц // Изв. вузов. Пищевая технология. – 1977. – №. 5. – С. 97–101.
8. Куц, П.С. К вопросу приближенной методики расчета кинетики конвективной сушки плоских материалов / П.С. Куц, А.И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 1975. – Т. 28, №4. – С. 594–598.
9. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.
10. Лыков, А.В. Теоретические основы строительной теплофизики / А.В. Лыков. – Минск: Изд-во Акад. наук БССР, 1961. – 520 с.
11. Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.
12. Ольшанский, А.И. Регулярный тепловой режим нагревания влажных плоских капиллярно-пористых материалов в процессе сушки / А.И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 2014. – Т. 87, №6. – С. 1308–1318.

References

1. Akulich P. V. *Calculations drying and heat exchange systems*. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2010. 444 p. (in Russian).
2. Lykov A. V. *Drying theory*. Moscow, Energiya Publ., 1968. 472 p. (in Russian).
3. Rudobashta S. V. *Heat engineering*. Moscow, Kolos Publ., 2010. 600 p. (in Russian).
4. Sazhin B. S. *Fundamentals of drying technique*. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 320 p. (in Russian).
5. Krasnikov V. V. *Conductive drying*. Moscow, Energiya Publ., 1973. 288 p. (in Russian).
6. Kuts P. S., Ol'shanskii A. I. Some features of heat and moisture transfer and approximate methods of calculating the drying kinetics of moist materials. *Journal of Engineering Physics*, 1977, vol. 32, no. 6, pp. 650–656. Doi: 10.1007/bf00862568
7. Ol'shanskii A. I., Kuts P. S. Some features of kinetics of drying food products. *Izvestia vuzov. Pishhevaya tekhnologiya = News of Institutes of Higher Education. Food technology*, 1977, no. 5, pp. 97–101 (in Russian).
8. Kuts P. S., Ol'shanskii A. I. Approximate method of calculating the kinetics of convective drying of flat materials. *Journal of Engineering Physics*, 1975, vol. 28, no. 4, pp. 419–422. Doi: 10.1007/bf00878212
9. Lykov A. V. *Heat conductivity theory*. Moscow, Vysshiaia shkola Publ., 1967. 600 p. (in Russian).
10. Lykov A. V. *Theoretical fundamentals of construction thermophysics*. Minsk, Publishing House of Academy of Sciences of BSSR, 1961. 520 p. (in Russian).
11. Lykov A. V., Mikhailov Y. A. *Theory of heat- and mass transfer*. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1963. 536 p. (in Russian).
12. Ol'shanskii A. I. Regular heat regime of heating of moist capillary-porous materials in the process of their drying. *Journal of Engineering Physics*, 2014, vol. 87, no. 6, pp. 1362–1373. Doi: 10.1007/s10891-014-1139-5

Информация об авторах

Ольшанский Анатолий Иосифович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: tiomp@vstu.by

Жерносек Сергей Васильевич – ассистент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: zs_85@mail.ru

Ольшанский Валерий Иосифович – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: tiomp@vstu.by

Information about the authors

Anatolii I. Ol'shanskii – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: tiomp@vstu.by

Sergei V. Zhernosek – Assistant of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: zs_85@mail.ru

Valery I. Ol'shanskii – Ph. D. (Engineering), Professor, Professor of the Department, Head of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: tiomp@vstu.by