

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-564-578>

УДК 66.047

Экспериментальные исследования тепловлагообмена в процессе конвективной сушки тонких влажных материалов

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

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Изложены новые способы обработки экспериментальных данных обобщенными комплексными переменными, характерными для процесса сушки. Представлены результаты исследования тепловлагообмена при конвективной сушке тонких плоских влажных капиллярно-пористых материалов. Даны экспериментальные уравнения для определения плотностей тепловых потоков, среднеинтегральных температур, длительности сушки, интенсивности испарения влаги во втором периоде сушки. Установлена связь плотностей тепловых потоков в первом и втором периодах с изменением температуры во втором периоде. Найдена зависимость для вычисления температуры в периоде падающей скорости сушки с учетом теплоты на нагревание влажного тела. Показаны уравнения для определения температуры во втором периоде по температурному коэффициенту сушки, скорости нагрева влажного материала и темпу нагрева влажного тела. Дано уравнение для определения длительности сушки по значению темпа убыли влагосодержания материала. Установлено выражение для вычисления интенсивности испарения влаги в первом и втором периодах сушки в зависимости от отношения влагосодержаний в первом периоде и текущего во втором. Определены условия регулярного режима по тепло- и влагообмену для второго периода сушки. Рассмотрены возможность определения темпа нагрева влажного тела по скорости нагрева с использованием графического дифференцирования кривой зависимости температуры от времени во втором периоде сушки, вопросы использования при исследовании процесса сушки методов теории регулярного режима нагрева влажных тел. Приведены формулы для определения темпа нагрева тела и темпа убыли влагосодержания. Представлена проверка точности обработки опытных данных и достоверности полученных экспериментальных уравнений для всех исследуемых материалов. В результате исследований определены основные кинетические характеристики, необходимые для расчета тепловлагообмена в процессе сушки.

Ключевые слова: среднеинтегральная температура, температура мокрого термометра, влагосодержание, коэффициент сушки, темп нагрева влажного тела, темп убыли влагосодержания, скорость сушки, критерий Био, число Ребиндера

Для цитирования: 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>

Адрес для переписки

Ольшанский Анатолий Иосифович
Витебский государственный
технологический университет
Московский проезд, 72,
210035, г. Витебск, Республика Беларусь
Тел.: +375 212 47-68-05
tiomp@vstu.by

Address for correspondence

Ol'shanskii Anatoliy I.
Vitebsk State
Technological University
72 Moscow passage
210035, Vitebsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 212 47-68-05
tiomp@vstu.by

Experimental Studies of Heat and Moisture Exchange in the Process of Convective Drying of Thin Wet Materials

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

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

Abstract. New ways of experimental data processing by generalized complex variables that are characteristic of the drying process are presented. The authors presented the results of a study of heat and moisture exchange in the convective drying of thin flat moist capillary-porous materials. As a result of the processing of the experimental data, equations were obtained for determining the densities of heat fluxes, average integral temperatures, drying time and moisture evaporation rate in the second drying period. The relationship between the densities of heat fluxes in the first and second periods and the temperature change in the second period is revealed. The dependence for calculating the temperature of the material in the period of the falling drying rate taking into account the heat that is expended to heat the wet body is presented. The equations for determining the temperature in the second period by the temperature coefficient of drying, the rate of heating of the wet material and the rate of heating of the wet body are presented as well. An equation for determining the drying time by the value of the rate of loss of moisture content of the material is given. A mathematical expression for calculating the intensity of moisture evaporation in the first and second drying periods depending on the ratio of moisture content in the first period and the current in the second moisture content one is set. The conditions of a regular regime for heat and moisture exchange for a second drying period are adduced. The authors consider the possibility of determining the rate of heating of wet material by the heating rate using the graphical differentiation of the temperature function, which is described by the curve, as a function of time in the second drying period. The problems of using the methods of the theory of the regular regime for heating wet bodies during the investigation of the drying process are considered. The formulas for determining the rate of heating of the body and the rate of loss of moisture content are given. The accuracy of the experimental data processing and the reliability of the experimental equations obtained for all the materials under study are verified. As a result of the research, all the basic kinetic characteristics necessary for the calculation of heat and moisture exchange in the drying process have been determined.

Keywords: average integrated temperature, temperature a moistened thermometer, moisture content, drying ratio, rate of heating the wet body, rate of decrease in moisture content, Bi criterion, Rebinder number

For citation: 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. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (6) 564–578. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-564-578> (in Russian)

Введение

Интенсивность тепловлагообмена при сушке существенно зависит от режимных параметров теплоносителя: температуры среды, скорости движения и относительной влажности. Эти характеристики влияют на длительность сушки и технологические свойства высушиваемого материала.

Температура теплоносителя – важнейший параметр, отвечающий за качество готового продукта. Однако интенсификация сушки за счет увеличения температуры теплоносителя, особенно для термочувствительных материалов, не всегда возможна, поскольку во влажном теле могут возникать значительные градиенты влагосодержания и температуры, приводящие к разрушению структуры материала.

Основное условие рациональной сушки – такой режим, который должен создавать благоприятные условия для испарения влаги при высоких технологических свойствах обрабатываемого материала и минимальной длительности сушки. Выбор рационального режима сушки конкретного материала связан с исследованием кинетики сушки, изучением наиболее общих закономерностей протекания процесса. Эффективными являются такие приближенные методы расчета кинетики сушки, которые основаны на обработке опытных данных наиболее устойчивыми обобщенными комплексными переменными, характерными для процесса сушки конкретного материала.

Постановка задачи

Для технологии сушки практическое значение имеет контроль температуры в процессе и время ее воздействия на влажный материал. При конвективной сушке тонких материалов тепломассообменные критерии Био малы и в реальных условиях сушки имеют приближенно одинаковые численные значения [1]. Главным фактором здесь является внешний теплообмен поверхности материала с окружающей средой, и скорость сушки слабо зависит от внутреннего массопереноса [1–3]. Существенно интенсифицировать внешний тепломассоперенос можно за счет активизации гидродинамического режима сушки [3, 4].

Эксперимент

Для исследования были подготовлены образцы из типичных капиллярно-пористых материалов: пористой керамики толщиной $\delta = 5$ мм, плотностью $\rho_0 = 1860$ кг/м³, пористостью 28 %; листового асбеста толщиной $\delta = 6$ мм, плотностью $\rho_0 = 770$ кг/м³; шерстяного строительного войлока толщиной $\delta = 8$ мм, плотностью $\rho_0 = 200$ кг/м³. Все образцы, подготовленные к эксперименту, предварительно выдерживались в эксикаторе для выравнивания влагосодержания по объему.

Кривые сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурные кривые $t = f(\tau)$ для процессов сушки представлены на рис. 1. Видно, что весь процесс сушки условно можно разделить на три участка: прогрева материала, постоянной скорости сушки (первый период) и падающей скорости (второй период). В стадии прогрева подводимая теплота расходуется на прогрев материала от начальной температуры до температуры мокрого термометра $t_{\text{м.т.}}$, приближенно принимаемой равной температуре поверхности материала $t_{\text{п}}$ в первом периоде. При сушке тонких материалов стадия прогрева обычно очень непродолжительна, и изменением влагосодержания в этой стадии можно пренебречь [4]. Скорость сушки возрастает от нуля до скорости сушки в первом периоде N . Для большинства тонких капиллярно-пористых материалов, когда лимитирующую роль играет внешний теплообмен, наблюдаются и период постоянной скорости сушки, и период постоянной температуры, протекающие до значения критического влагосодержания $\bar{u}_{\text{кр}}$ (рис. 1) [2, 4, 5]. С уменьшением влагосодержания мате-

риала $\bar{u} < \bar{u}_{кр}$ начинается период убывающей скорости сушки с непрерывным увеличением температуры материала до температуры среды t_c при времени сушки $\tau \rightarrow \infty$. В периоде падающей скорости сушки наступает регулярный режим по тепло- и влагообмену, и отсчет времени сушки удобно производить от нуля, а температуры от $t_{м.т}$ [1, 2].

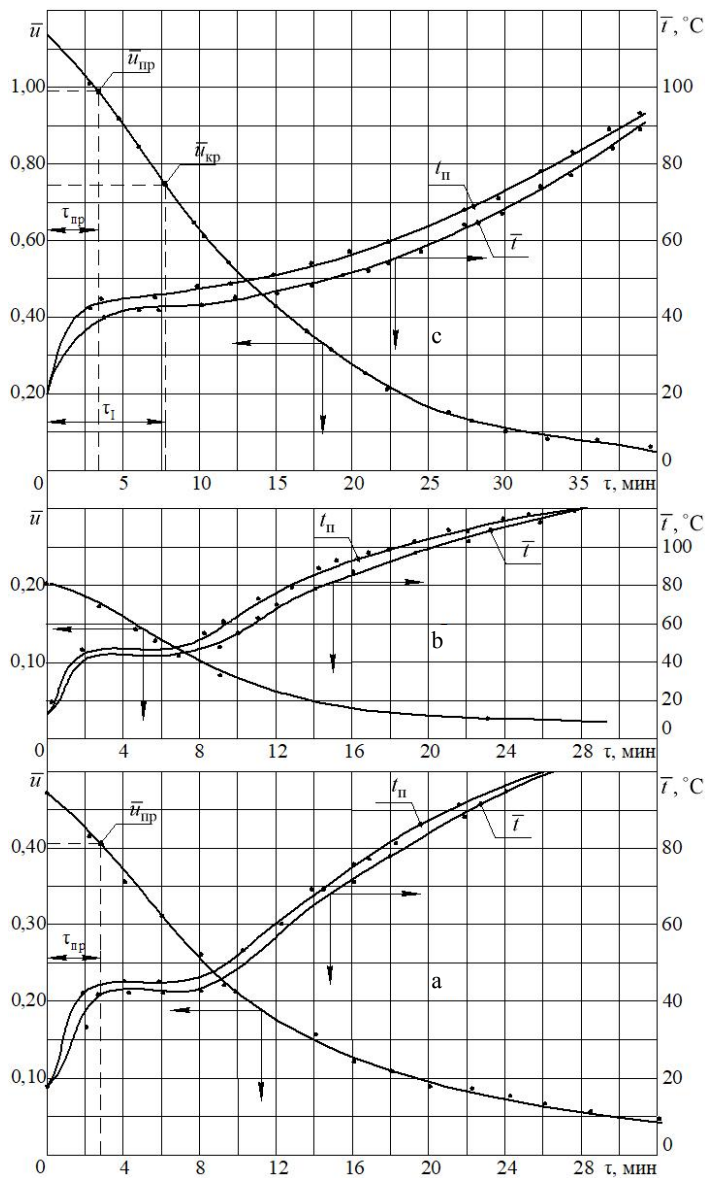


Рис. 1. Кривые сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурные кривые $t = f(\tau)$ для процессов сушки листового асбеста (а), пористой керамики (б) и шерстяного войлока (с) при режимах сушки: а – $t_c = 120\text{ }^\circ\text{C}$; $v = 3\text{ м/с}$; б – $120\text{ }^\circ\text{C}$; 5 м/с ; с – $120\text{ }^\circ\text{C}$; 3 м/с

Fig. 1. Curves of drying $\bar{u} = f(\tau)$ and temperature curves $t = f(\tau)$ for drying processes of sheet asbestos (a), porous ceramics (b) and wool felt (c) under the following drying conditions: а – $t_c = 120\text{ }^\circ\text{C}$; $v = 3\text{ м/с}$; б – $120\text{ }^\circ\text{C}$; 5 м/с ; с – $120\text{ }^\circ\text{C}$; 3 м/с

Обработка эксперимента. Вывод уравнений

Основное уравнение кинетики сушки [2–5]

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

где q_I, q_{II} – плотность теплового потока в первом и втором периодах сушки; Rb – число Ребиндера; N^* – относительная скорость сушки,

$$N^* = \frac{1}{N} \left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right|, \quad (2)$$

N – скорость сушки в первом периоде.

Скорость сушки $\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = K(\bar{u} - u_p)$, где коэффициент сушки K [2–4]

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

где $\bar{u}_{кр}, u_p$ – критическое и равновесное влагосодержание материала.

На основании (1)–(3) можно записать

$$\frac{q_{II}}{q_I} \approx \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right) (1 + Rb). \quad (4)$$

При температурах сушильного агента выше 90 °С равновесное влагосодержание $u_p = 0$ [2, 5].

Для многих капиллярно-пористых влажных материалов зависимость числа Ребиндера от влагосодержания выражается эмпирической формулой [2–5]

$$Rb = \frac{c_{вл} b}{r} = A \exp(-m(\bar{u} - u_p)), \quad (5)$$

где $b = d\bar{t} / d\bar{u}$ – температурный коэффициент сушки; r – удельная теплота парообразования; $c_{вл}$ – удельная теплоемкость влажного материала, определяемая по соотношению [3]

$$c_{вл} = \frac{c_0 + c_{ж}\bar{u}}{1 + \bar{u}},$$

$c_0, c_{ж}$ – удельная теплоемкость сухого тела и жидкости.

Постоянные A и m в уравнении (5) определяются экспериментально и зависят от вида влажного материала. Значения A и m для пористой керамики, листового асбеста и шерстяного войлока равны 0,5; постоянная m – соответственно 20; 15 и 6 [6, 7].

Число Rb позволяет проводить расчет теплообмена по данным влагообмена, не прибегая к определению коэффициента теплообмена по критериальным уравнениям [2–5].

Установлено, что коэффициент теплообмена $\bar{\alpha}$ во втором периоде уменьшается по эмпирической зависимости [2–5]

$$\frac{\bar{\alpha}}{\alpha_{кр}} = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^n \quad (6)$$

Коэффициент n не зависит от режима сушки и определяется только видом влажного материала. Постоянная n по экспериментальным данным [6, 7] при сушке рассматриваемых материалов равна 0,5.

Отношение плотностей тепловых потоков для процесса сушки с учетом (6)

$$\frac{q_{II}}{q_I} = \frac{\bar{\alpha}(t_c - \bar{t})}{\alpha_{кр}(t_c - t_{м.т.})} = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^n \frac{\Delta t_{II}}{\Delta t_I}, \quad (7)$$

где $\Delta t_I, \Delta t_{II}$ – разность температур в первом и втором периодах сушки.

Из равенства уравнений (4) и (7) получим

$$\frac{\Delta t_{II}}{\Delta t_I} \approx \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{n_0} (1 + Rb), \quad (8)$$

где $n_0 = 1 - n$.

Величина критического влагосодержания $\bar{u}_{кр}$ для многих материалов при изменении режима сушки меняется незначительно, и этим изменением можно пренебречь [2, 5].

Обработка опытных данных по сушке пористой керамики, листового асбеста и войлока в интервале изменения режимов сушки $t_c = 90^\circ\text{C}$ и $t_c = 120^\circ\text{C}$, скорости воздуха $v = 3$ м/с и $v = 5$ м/с для зависимости (8) представлена на рис. 2а.

Изображенные на рис. 2а кривые представляют экспоненциальные зависимости, приближенно аппроксимируемые для данных материалов уравнением

$$\frac{\Delta t_{II}}{\Delta t_I} \approx A_0 \exp \left[3,35 \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{0,5} (1 + Rb) \right], \quad (9)$$

где A_0 – линейная функция критического влагосодержания, определяемая приближенно выражением

$$A_0 = 0,036 + 0,061 \bar{u}_{кр}.$$

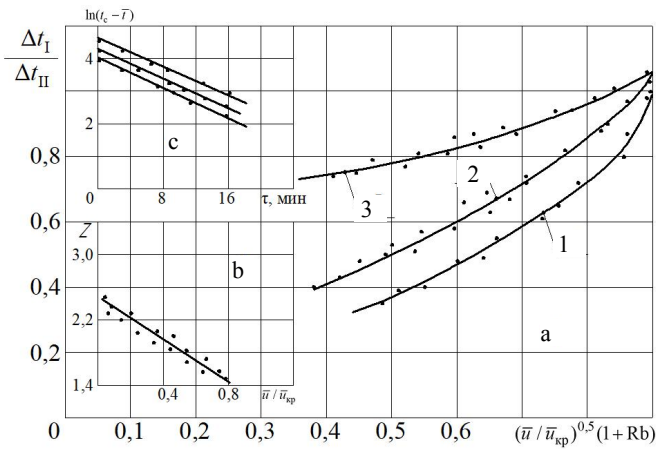


Рис. 2. Зависимости: отношения $\Delta t_{II} / \Delta t_I$ от комплекса $(\bar{u} / \bar{u}_{кр})^{0.5} (1 + Rb)$ для процессов сушки керамики (1), асбеста (2), войлока (3) в интервале режимов сушки $t_c = 90$ и 120 °С, и скорости воздуха $v = 3$ и 5 м/с (а); $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\tau)$ для сушки пористой керамики (б) при режимах: 1 – 90 °С; 2 – 120 ; 3 – 150 °С; $v = 5$ м/с; $Z = f(\bar{u} / u_{кр})$ в процессах сушки керамики и войлока (с) при режимах сушки $t_c = 90$ – 120 °С; скорость воздуха $v = 3$ – 5 м/с

Fig. 2. Dependencies: Relationships $\Delta t_{II} / \Delta t_I$ on the complex $(\bar{u} / \bar{u}_{кр})^{0.5} (1 + Rb)$ for drying processes of ceramics (1), asbestos (2), felt (3) in the interval of drying regimes t_c of 90 and 120 °С and air velocity v of 3 and 5 m/s (a); $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\tau)$ – for drying porous ceramics (b) under the conditions of: 1 – 90 °С; 2 – 120 ; 3 – 150 °С; $v = 5$ m/s; $Z = f(\bar{u} / u_{кр})$ – in the processes of drying ceramics and felt (c) under drying conditions of $t_c = 90$ – 120 °С; air velocity $v = 3$ – 5 m/s

Среднеинтегральная температура материала с учетом теплоты на нагрев влажного тела в периоде падающей скорости сушки определяется решением уравнения (8)

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{м.т}) \Phi, \quad (10)$$

$$\text{где } \Phi = A_0 \exp \left[3,35 \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{0,5} \cdot (1 + Rb) \right].$$

Среднеинтегральная температура материала во втором периоде определяется из эксперимента на основе температурного коэффициента сушки $b = d\bar{t} / d\bar{u}$, который находится графическим дифференцированием температурной кривой $t = f(\bar{u})$ [2].

В периоде постоянной скорости сушки температурный коэффициент $b = 0$. Зависимость $b = f(\bar{u})$ для ряда влажных материалов, как и (5), выражается эмпирическим уравнением [2, 6, 7]

$$b = \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}} = D_0 \exp(-m_0(\bar{u} - u_p)). \quad (11)$$

Постоянная m_0 определяется видом влажного материала, а коэффициент D_0 является функцией температуры теплоносителя.

Для средней температуры можно записать [5]

$$\bar{t}(\bar{u}) = t_c - \int_{u_p}^{\bar{u}} b(\bar{u}) d(\bar{u}), \quad \bar{u} < \bar{u}_{кр}. \quad (12)$$

Подставляя в (12) формулу (11) и интегрируя в заданных пределах, получим уравнение температурной кривой

$$\bar{t}(\bar{u}) = t_c - \frac{D_0}{m_0} [1 - \exp(-m_0(\bar{u} - u_p))], \quad (13)$$

где m_0 – постоянная, для керамики $m_0 = 16$; для асбеста $m_0 = 14$; для войлока $m_0 = 8,5$ [6, 7].

Результаты обработки опытных данных для зависимости $\lg b = f(\bar{u})$ (а) и коэффициента $D_0 = f(t_c)$ (б) при сушке керамики (1), асбеста (2) и войлока (3) представлены на рис. 3. Зависимость $D_0 = f(t_c)$ приближенно выражается как

$$D_0 = \frac{t_c}{0,084 + 0,15\bar{u}_{кр}}. \quad (14)$$

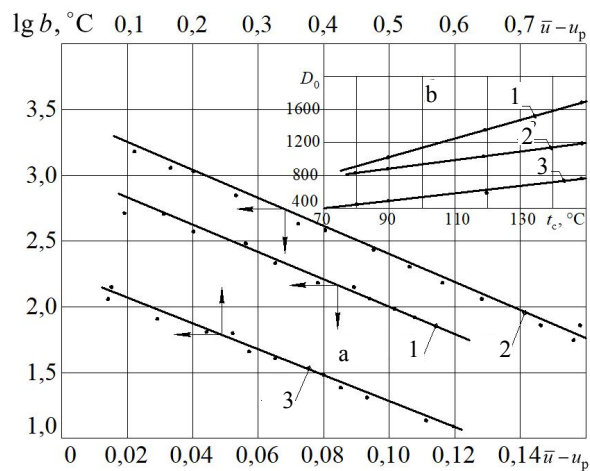


Рис. 3. Зависимость температурного коэффициента сушки $\lg b = f(\bar{u})$ (а) и постоянных $D_0 = f(t_c)$ (б) для процесса сушки пористой керамики (1), листового асбеста (2) и шерстяного войлока (3) при режимах, указанных на рис. 2а

Fig. 3. Dependence of temperature coefficient of drying $\lg b = f(\bar{u})$ (а) and constant values $D_0 = f(t_c)$ (б) for the drying process of porous ceramics (1), sheet asbestos (2) and wool felt (3) under the conditions indicated in fig. 2а

Подставляя (14) в (13), окончательно получим

$$\bar{t} = t_c - \frac{t_c}{m_0(0,084 + 0,15\bar{u}_{кр})} [1 - \exp(-m_0(\bar{u} - u_p))]. \quad (15)$$

Во втором периоде сушки наступает регулярный режим [1, 2], и для второго периода можно записать для среднеинтегральной температуры соотношение [1, 8]

$$\frac{1}{t_c - \bar{t}} \frac{d\bar{t}}{d\tau} = m_t = \text{const}, \quad (16)$$

где m_t – темп нагрева влажного тела.

Если обозначить скорость нагрева тела во втором периоде через $b' = d\bar{t} / d\tau$, то (16) примет вид

$$b' = m_t(t_c - \bar{t}). \quad (17)$$

Коэффициент b' является функцией температуры, влагосодержания и времени сушки и определяется графическим дифференцированием температурной кривой $t = f(\tau)$. Впервые такой метод был использован А. В. Лыковым [9].

Темп нагрева тела определяется экспериментальным измерением температур в любой точке тела для двух последовательных моментов времени регулярного режима [1, 8, 10]

$$b' = m_t = \frac{\ln \frac{t_c - \bar{t}_1}{t_c - \bar{t}_2}}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (18)$$

На рис. 2b дана зависимость $\ln(t_c - \bar{t}) = f(\tau)$ для процесса сушки пористой керамики при разных режимах сушки. Видно, что для регулярного режима такая температурная функция описывается уравнением прямой в логарифмических координатах [1, 8, 10]. Значения b' для устранения ошибок, возникающих при графическом дифференцировании кривой $t = f(\tau)$, определялись также по (16).

Результаты обработки эксперимента для зависимости $b' = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$ приведены на рис. 4. Видно, что для данных материалов образуются экспоненциальные кривые, которые приближенно аппроксимируются уравнением

$$b' = \frac{d\bar{t}}{d\tau} \approx S \exp\left(Z \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right). \quad (19)$$

Постоянная S является линейной функцией температуры теплоносителя t_c и определяется уравнением

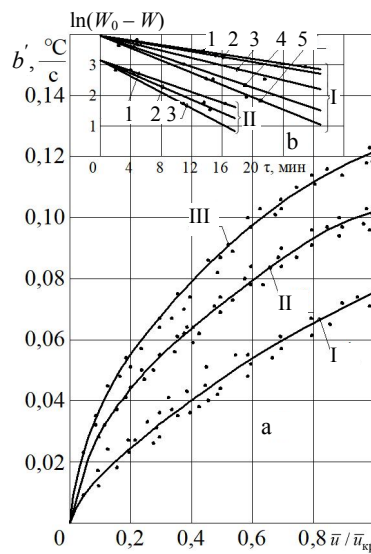
$$S \approx 2,2 \cdot 10^{-4} t_c. \quad (20)$$

После простых преобразований на основании (17), (19) и (20) для среднеинтегральной температуры получим

$$\bar{t} = t_c - \frac{2,2 \cdot 10^{-4} t_c}{m_t} \exp\left(Z \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right), \quad \bar{u} < \bar{u}_{кр}. \quad (21)$$

Рис. 4. Зависимости: температурного коэффициента сушки $b' = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$ (а) в процессах сушки пористой керамики (I), листового асбеста (II) и шерстяного войлока (III) при режимах: $t_c = 90$ и 120 °C; скорость воздуха $v = 3$ и 5 м/с; $\ln(W_0 - W) = f(\tau)$ (b) для процесса сушки листового асбеста (I) и пористой керамики (II). Режимы сушки: I – 1 – $t_c = 90$ °C; $v = 5$ м/с; 2 – 120; 3; 3 – 120; 5; 4 – 120; 10; 5 – 150 °C; 5 м/с; II – 1 – 90; 5; 2 – 120; 3; 3 – 120 °C; 5 м/с

Fig. 4. Dependencies: temperature coefficient of drying $b' = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$ (a) in the drying processes of porous ceramics (I), sheet asbestos (II) and wool felt (III) under the following conditions: $t_c = 90$ and 120 °C; air velocity $v = 3$ and 5 m/s; $\ln(W_0 - W) = f(\tau)$ (b) for the drying process of sheet asbestos (I) and porous ceramics (II). Drying conditions: I – 1 – $t_c = 90$ °C; $v = 5$ m/s; 2 – 120; 3; 3 – 120; 5; 4 – 120; 10; 5 – 150 °C; 5 m/s; II – 1 – 90; 5; 2 – 120; 3; 3 – 120 °C; 5 m/s



Величина Z является линейной функцией отношения влагосодержаний и для пористой керамики, и для листового асбеста в указанном интервале изменения параметров сушки. В результате обработки экспериментальных данных получена зависимость (рис. 2с)

$$Z = \frac{1}{0,59\bar{u}/\bar{u}_{кр} + 0,23}.$$

Шерстяной войлок по своим теплофизическим и структурно-механическим свойствам значительно отличается от керамики и асбеста: плотность и теплопроводность в несколько раз ниже, а удельная теплоемкость в два раза выше, и величина Z для сушки войлока

$$Z = 0,375\bar{u}/\bar{u}_{кр} - 0,05.$$

Если построить графики зависимости между скоростью нагрева b' и температурой влажного материала \bar{t} по двум произвольным значениям температуры, то такие графики представляют собой прямые, продолжение которых будет отсекать на осях координат отрезки, равные по оси абсцисс температуре среды t_c , а по оси ординат – величине $m_t c$ [9]. Графики для процессов сушки листового асбеста (а) и пористой керамики (b) приведены на рис. 5.

Отрезки, отсекаемые по осям координат: $OB = t_c$, $OA = m_t c$ (рис. 5). Тангенс угла наклона таких прямых [9]

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\bar{\alpha}}{c_{вл} \rho_0 R_V} = m_t.$$

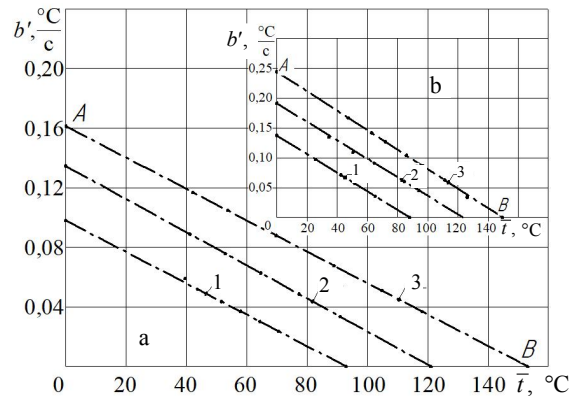


Рис. 5. Зависимость скорости нагрева $b' = f(t_c)$ для процессов сушки листового асбеста (а) и пористой керамики (б). Режимы сушки: 1 – $t_c = 90$ °C; $v = 3$ м/с; 2 – 120; 5; 3 – 150 °C; 10 м/с

Fig. 5. Dependence of heating rate $b' = f(t_c)$ for drying processes of sheet asbestos (a) and porous ceramics (b). Drying conditions: 1 – $t_c = 90$ °C; $v = 3$ m/s; 2 – 120; 5; 3 – 150 °C; 10 m/s

Следовательно, зависимость $b' = f(\bar{t})$ по одному режиму сушки позволяет по двум значениям температуры \bar{t} определить темп нагрева влажного материала для разных режимов.

Из решения уравнений тепло- и массопереноса при малых значениях тепломассообменных критериев Био для тонких материалов, когда градиенты температуры по сечению незначительны, а термическим переносом вещества можно пренебречь, следует, что для относительной температуры и относительного влагосодержания можно воспользоваться формулами [1, 10]:

$$\bar{\Theta} = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{м.т}} = \exp(-\text{Bi} \text{Fo}) = \exp(-m_t \tau_{II}); \quad (22)$$

$$\bar{U} = \frac{\bar{u} - u_p}{u_0 - u_p} = \exp(-\text{Bi}_m \text{Fo}_m) = \exp(-m_u \tau), \quad (23)$$

где m_t , m_u – темп нагрева влажного тела и темп убыли влагосодержания.

При экспериментальной обработке ряда тонких материалов (пористая керамика, листовый асбест, шерстяной войлок, технический картон, пластины глины, $\delta \approx 10$ –12 мм) получена приближенная эмпирическая зависимость для темпа нагрева m_t [10]

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

Темп убыли влагосодержания m_u является сложной функцией режима сушки, начального влагосодержания и скорости сушки в первом периоде. Анализ результатов обработки опытных данных для указанных материалов позволил установить приближенную зависимость [7, 10, 11]

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

На рис. 4б даны зависимости $\lg(W_0 - W) = f(\tau)$ без учета кратковременной стадии прогрева материала. Видно, что такие зависимости начинаются от W_0 и образуют систему прямых, направление которых определяется режимом сушки [7, 10, 11].

Из (22) и (23) вычисляются среднеинтегральная температура \bar{t} и длительность сушки [7, 10]:

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

$$\tau = -\frac{1}{m_u} \ln \frac{W}{W_0} \text{ при } W_p = 0. \quad (27)$$

Время сушки во втором периоде

$$\tau_{II} = -\frac{1}{m_u} \ln \frac{W}{W_{кр}} \text{ при } W_p = 0. \quad (28)$$

Формулу (22) можно упростить, если воспользоваться равенством

$$\bar{\Theta} = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{м.т}} = \exp(-m_t \tau_{II}) = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^\beta, \quad (29)$$

где β – показатель степени, определяется зависимостью

$$\beta = -\frac{m_t \tau_{II}}{\ln(\bar{u} / \bar{u}_{кр})}.$$

Тогда среднеинтегральная температура находится из выражения

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{м.т}) \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^\beta. \quad (30)$$

Регуляризация процесса сушки во втором периоде происходит по тепловым потокам [1, 8], и можно записать

$$q_{II} = q_I \exp(-m_t \tau_{II}) = r \rho_0 R_V N \exp(-m_t \tau_{II}). \quad (31)$$

Интенсивность испарения влаги из материала в периоде постоянной скорости сушки определяется из уравнения баланса теплоты, когда вся теплота, подведенная к телу, идет только на испарение влаги [1, 3, 4]

$$j_I = \frac{q_I}{r} = \frac{r \rho_0 R_V N}{r} = \rho_0 R_V N. \quad (32)$$

Интенсивность испарения влаги во втором периоде, учитывая только теплоту на испарение влаги из материала, определяется уравнением

$$j_{II} = \frac{q_{II}}{r} = \rho_0 R_V \left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right|. \quad (33)$$

На основании (4) при $Rb = 0$ и $u_p = 0$ получим

$$j_{II} = \rho_0 R_V N \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \approx j_I \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right). \quad (34)$$

Результаты расчетов основных параметров кинетики сушки для материалов и сопоставление с экспериментами приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Расчетные значения длительности сушки, плотностей тепловых потоков, интенсивности испарения влаги и сопоставление с экспериментом по формулам (27), (28), (4), (31) и (34) для сушки пористой керамики, асбеста и войлока
Computation of the calculated values of drying time, heat flux densities, moisture evaporation intensity and comparison with the experiment fulfilled in accordance with formulas (27), (28), (4), (31) and (34) for drying porous ceramics, asbestos and felt

Пористая керамика: $\rho_0 = 1860 \text{ кг/м}^3$; $\delta = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Режим сушки: $t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 3 \text{ м/с}$; $\bar{u}_0 = 0,2$; $\bar{u}_{кр} = 0,1$; $N = 2,55 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$; $q_I = 5030 \text{ Вт/м}^2$; $m_u = 0,089 \text{ мин}^{-1}$; $m_t = 0,094 \text{ мин}^{-1}$; $j_I = 2,08 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$								
\bar{u}	τ , мин (экс)	τ , мин (27)	τ_{II} , мин	τ_{II} , мин (28)	q_{II} , Вт/м ² (4)	q_{II} , Вт/м ² (31)	j_{II} , кг/(м ² ·с), $\times 10^{-3}$ (34)	1 + Rb
0,08	10,2	10,35	2,8	2,52	4286	3930	1,66	1,09
0,06	13,8	13,60	5,6	5,7	3280	2986	1,25	1,12
0,04	18,5	18,20	9,7	10,35	2214	1935	0,83	1,20
0,02	26,6	26,10	17,6	18,20	1248	1130	0,42	1,34
Листовой асбест: $\rho_0 = 770 \text{ кг/м}^3$; $\delta = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Режим сушки: $t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 5 \text{ м/с}$; $\bar{u}_0 = 0,46$; $\bar{u}_{кр} = 0,2$; $N = 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$; $q_I = 5300 \text{ Вт/м}^2$; $m_u = 0,098 \text{ мин}^{-1}$; $m_t = 0,077 \text{ мин}^{-1}$; $j_I = 2,19 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$								
0,16	10,2	10,7	1,25	1,85	4400	4580	1,75	1,045
0,14	11,8	12,1	2,42	3,10	3932	4140	1,53	1,065
0,12	13,2	13,7	3,82	4,60	3435	3520	1,32	1,096
0,10	14,7	15,3	5,80	6,45	2915	3200	1,09	1,110
0,08	16,9	17,8	7,70	8,30	2376	2600	0,87	1,120
0,06	19,5	20,7	9,95	10,70	1828	2236	0,66	1,125
0,04	23,8	24,6	12,20	14,50	1325	1570	0,44	1,280
0,02	31,6	31,9	20,85	22,10	710	960	0,22	1,320
Шерстяной войлок: $\rho_0 = 200 \text{ кг/м}^3$; $\delta = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Режим сушки: $t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 3 \text{ м/с}$; $\bar{u}_0 = 1,14$; $\bar{u}_{кр} = 0,75$; $N = 8,6 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$; $q_I = 3680 \text{ Вт/м}^2$; $m_u = 0,075 \text{ мин}^{-1}$; $m_t = 0,0256 \text{ мин}^{-1}$; $j_I = 1,51 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$								
0,6	9,0	8,50	2,7	2,9	2985	3245	1,20	1,014
0,5	11,2	10,95	5,2	5,4	2514	2770	1,00	1,025
0,4	14,2	13,93	7,8	8,3	2051	2280	0,80	1,046
0,3	17,2	17,70	10,6	11,9	1593	–	0,60	1,083
0,2	22,4	23,10	14,7	15,8	1130	–	0,40	1,152
0,1	28,5	–	19,5	–	628	–	0,12	1,270

Таблица 2

Сравнение расчетных значений среднееинтегральных температур с экспериментальными по формулам (10), (15), (21), (26) и (30) для процессов сушки пористой керамики, листового асбеста и шерстяного войлока
Comparison of the calculated values of the average integrated temperatures with the experimental ones using the formulas (10), (15), (21), (26) and (30) for the drying processes of porous ceramics, sheet asbestos and wool felt

Пористая керамика: $\rho_0 = 1860 \text{ кг/м}^3$; $\delta = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ Режим сушки: $t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 3 \text{ м/с}$; $\bar{u}_0 = 0,2$; $\bar{u}_{кр} = 0,1$; $N = 2,55 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$; $q_1 = 5030 \text{ Вт/м}^2$; $m_u = 0,089 \text{ мин}^{-1}$; $m_t = 0,094 \text{ мин}^{-1}$; $j_1 = 2,08 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$								
\bar{u}	τ_{II} , мин (экс)	\bar{t} , $^\circ\text{C}$ (экс)	\bar{t} , $^\circ\text{C}$ (10)	\bar{t} , $^\circ\text{C}$ (15)	\bar{t} , $^\circ\text{C}$ (21)	\bar{t} , $^\circ\text{C}$ (26)	\bar{t} , $^\circ\text{C}$ (30)	1 + Rb
0,08	2,8	64	64,7	60,5	64,0	64,6	62,7	1,09
0,06	4,6	72	70,7	73,2	74,5	72,6	74,2	1,12
0,04	8,7	82	79,5	80,4	85,5	85,6	86,5	1,20
0,02	15,6	96	93,0	92,6	98,0	98,0	99,0	1,34
Листовой асбест: $\rho_0 = 770 \text{ кг/м}^3$; $\delta = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ Режим сушки: $t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 5 \text{ м/с}$; $\bar{u}_0 = 0,46$; $\bar{u}_{кр} = 0,2$; $N = 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$; $q_1 = 5300 \text{ Вт/м}^2$; $m_u = 0,098 \text{ мин}^{-1}$; $m_t = 0,077 \text{ мин}^{-1}$; $j_1 = 2,19 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$								
0,16	1,25	51	52,6	52,6	54,2	49,5	49,5	1,045
0,14	2,42	53	55,4	55,0	52,5	54,6	54,6	1,065
0,12	3,82	58	58,5	58,8	59,0	60,5	60,5	1,096
0,10	5,80	62	62,5	62,4	58,5	64,8	65,8	1,121
0,08	7,70	68	65,6	69,2	64,5	72,5	67,4	1,152
0,06	9,25	72	69,5	73,8	74,5	76,5	76,5	1,210
0,04	12,20	82	83,0	83,0	83,5	85,5	84,5	1,260
0,02	20,80	92	94,0	94,0	95,0	99,0	96,0	1,320
Шерстяной войлок: $\rho_0 = 200 \text{ кг/м}^3$; $\delta = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ Режим сушки: $t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 3 \text{ м/с}$; $\bar{u}_0 = 1,14$; $\bar{u}_{кр} = 0,75$; $N = 8,6 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$; $q_1 = 3680 \text{ Вт/м}^2$; $m_u = 0,075 \text{ мин}^{-1}$; $m_t = 0,0256 \text{ мин}^{-1}$; $j_1 = 1,51 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$								
0,6	2,7	45	44,8	46,0	45,0	43,5	43,6	1,014
0,5	5,2	48	47,5	46,3	49,0	47,4	47,2	1,025
0,4	7,8	52	52,5	50,6	52,5	52,0	52,3	1,046
0,3	10,6	56	55,4	54,6	55,0	56,5	56,5	1,083
0,2	14,7	60	60,5	60,5	58,2	61,5	62,5	1,152
0,1	19,5	65	67,5	—	64,0	67,5	66,8	1,270

Из таблиц видно, что с уменьшением влагосодержания погрешность несовпадения значений увеличивается. Кривые сушки и температурные кривые во втором периоде, как правило, описываются двумя сопряженными экспонентами [2, 4, 5], и аппроксимировать эти сложные кривые одной функцией практически невозможно.

ВЫВОД

Полученные обработкой эксперимента комплексными обобщенными переменными уравнения позволяют расчет теплообмена в процессах сушки проводить по данным влагообмена без определения коэффициентов теплообмена. Применение уравнений требует только знания критического влагосодержания, скорости сушки и температуры материала в первом

периоде. Наряду с другими приближенными экспериментальными методами расчета кинетики сушки полученные уравнения могут использоваться для расчета сушки тонких плоских материалов при значениях теплообменного критерия Био, меньше единицы, и малых градиентах температуры по сечению влажного тела.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. Михайлов. Л.: Госэнергоиздат, 1963. 536 с.
2. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 472 с.
3. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. Минск: Белорусская наука, 2010. 443 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. Лыков, А. В. Кинетика теплообмена в процессе сушки влажных материалов / А. В. Лыков, П. С. Куц, А. И. Ольшанский // ИФЖ. 1972. Т. 23, № 3. С. 401–406.
7. Ольшанский, А. И. Кинетика теплообмена и экспериментальные методы расчета температуры материала в процессе сушки / А. И. Ольшанский // ИФЖ. 2013. Т. 86, № 3. С. 584–594.
8. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. М.: Высш. шк., 1967. 600 с.
9. Лыков, А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / А. В. Лыков. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956. 488 с.
10. Ольшанский, А. И. Регулярный тепловой режим нагревания влажных плоских капиллярно-пористых материалов в процессе сушки / А. И. Ольшанский // ИФЖ. 2014. Т. 87, № 6. С. 1308–1318.
11. Ольшанский, А. И. Исследование процесса сушки текстильных и обувных влажных материалов методом регулярного режима / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2015. № 28. С. 95–102.

Поступила 26.06.2018 Подписана в печать 30.08.2018 Опубликована онлайн 28.11.2018

REFERENCES

1. Lykov A. V., Mikhailov Y. (1963) *Theory of Heat- and Mass Transfer*. Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 536 (in Russian).
2. Lykov A. V. (1968) *Drying Theory*. Moscow, Energiya Publ. 472 (in Russian).
3. Akulich P. V. (2010) *Calculations of Drying and Heat Exchange Devices*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 443 (in Russian).
4. Sazhin B. S. (1984) *Fundamentals of Drying Technique*. Moscow, Khimiya Publ. 320 (in Russian).
5. Krasnikov V. V. (1973) *Conductive Drying*. Moscow, Energiya Publ. 288 (in Russian).
6. 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>.
7. Ol'shanskii A. I. (2013) Heat Transfer Kinetics and Experimental Methods for Calculating the Material Temperature in the Drying Process. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 86 (3), 622–633. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0876-1>.
8. Lykov A. V. (1967) *Theory of Heat Conductivity*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 600 (in Russian).
9. Lykov A. V. (1956) *Heat and Mass Transfer in Drying Processes*. Moscow – Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 488 (in Russian).
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. Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V. (2015) Study of Drying Textile and Footwear Moist Materials by the Regular Regime Method. *Vestnik Vitebskogo Gosudarstvennogo Tekhnologicheskogo Universiteta = Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 28, 95–102 (in Russian).

Received: 26 June 2018

Accepted: 30 August 2018

Published online: 28 November 2018